DISEÑO ÓPTIMO DE LAS TRAYECTORIAS DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL MEDIANTE INTELIGENCIA ARTIFICIAL. EN CASO DE OBTENER UNA TRAYECTORIA HORIZONTAL CONSIDERESE LA FENOMENOLOGIA Y LAS PROPIEDADES FISICO QUIMICAS DEL LODO PARA INCREMENTAR EL TRANSPORTE DE SOLIDOS Y LA LIMPIEZA DEL POZO

NELSON ENRIQUE BARROS GALVIS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERAS FISICOQUIMICAS

ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

BUCARAMANGA

2008

DISEÑO ÓPTIMO DE LAS TRAYECTORIAS DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL MEDIANTE INTELIGENCIA ARTIFICIAL. EN CASO DE OBTENER UNA TRAYECTORIA HORIZONTAL CONSIDERESE LA FENOMENOLOGIA Y LAS PROPIEDADES FISICO QUIMICAS DEL LODO PARA INCREMENTAR EL TRANSPORTE DE SOLIDOS Y LA LIMPIEZA DEL POZO

NELSON ENRIQUE BARROS GALVIS

Trabajo de investigación presentado como requisito para optar a los títulos de Ingeniero de Petróleos e Ingeniero Químico

Director

ALVARO RAMIREZ GARCIA

Ingeniero Químico Ph.D.

Codirectores

EDELBERTO HERNANDEZ TREJOS

Ingeniero de Petróleos

NESTOR FERNANDO SAAVEDRA

Ingeniero de Petróleos M.Sc.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERAS FISICOQUIMICAS

ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

BUCARAMANGA

2008

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

NOTA DEL PROYECTO DE GRADO

NOMBRE DEL ESTUDIANTE	CÓDIGO
NELSON ENRIQUE BARROS GALVIS	1973264

TITULO DEL PROYECTO
"DISEÑO ÓPTIMO DE LAS TRAYECTORÍAS DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL MEDIANTE INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN CASO DE OBTENER UNA TRAYECTORÍA HORIZONTAL CONSIDÉRESE LA FENOMENOLOGÍA Y LAS PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS DEL LODO PARA INCREMENTAR EL TRANSPORTE DE SÓLIDOS Y LA LIMPIEZA DEL POZO"

CODIGO	FACULTAD	CARRERA
	INGENIERÍAS FISICOQUIMICAS	INGENIERIA QUIMICA

CALIFICACIÓN
CUATRO PUNTO SIETE (4.7)

DIRECTOR DEL PROYECTO

NOMBRE: ALVARO RAMÍREZ GARCÍA — FIRMA

CALIFICADORES

F N ALVARO RAMÍREZ GARCÍA CODIRECTOR	F N HUMBERTO ESCALANTE H. CALIFICADOR
F N ING. EDELBERTO HERNANDEZ	F N ING. FERNANDO CALVETE

FECHA: A 08 | M 05 | D 12

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

NOTA DEL PROYECTO DE GRADO

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: NELSON ENRIQUE BARROS GALVIS — CÓDIGO: 1973264

TITULO DEL PROYECTO
"DISEÑO ÓPTIMO DE LAS TRAYECTORÍAS DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL MEDIANTE INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN CASO DE OBTENER UNA TRAYECTORÍA HORIZONTAL CONSIDÉRESE LA FENOMENOLOGÍA Y LAS PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS DEL LODO PARA INCREMENTAR EL TRANSPORTE DE SÓLIDOS Y LA LIMPIEZA DEL POZO"

CODIGO | FACULTAD: INGENIERÍAS FISICOQUIMICAS | CARRERA: INGENIERIA QUIMICA

CALIFICACIÓN: CUATRO PUNTO SIETE (4.7)

DIRECTOR DEL PROYECTO

NOMBRE: ALVARO RAMÍREZ GARCÍA — FIRMA

CALIFICADORES

F N ALVARO RAMÍREZ GARCÍA — CODIRECTOR
F N HUMBERTO ESCALANTE H. — CALIFICADOR
F N ING. EDELBERTO HERNANDEZ
F N ING. FERNANDO CALVETE

FECHA: A 08 | M 05 | D 12

Universidad Industrial de Santander

NOTA DEL PROYECTO DE GRADO | Mayo 19 /08

NOMBRE DEL ESTUDIANTE	CODIGO
NELSON ENRIQUE BARROS GALVIS	1973264

TITULO DEL PROYECTO:

"DISEÑO OPTIMO DE LAS TRAYECTORIAS DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL MEDIANTE INTELIGENCIA ARTIFICIAL. EN CASO DE OBTENER UNA TRAYECTORIA COSIDERESE LA FENOMENOLOGIA Y LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL LODO PARA INCREMENTAR EL TRANSPORTE DE SÓLIDOS Y LA LIMPIEZA DEL POZO"

Registros No.	FACULTAD	CARRERA
	CIENCIAS FISICO-QUIMICAS	ESCUELA INGENIERIA DE PETROLEOS

Calificación (letra y número)	Créditos
CUATRO, SIETE (4,7)	

Nombre del Director	Firma del Director
ING. ALVARO RAMIREZ	

Nombre del Co-Director	Firma del Director
ING. EDELBERTO HERNANDEZ	

CALIFICADORES

F	F
N	N
ING. FERNANDO CALVETE	ING. HUMBERTO ESCALANTE

Universidad Industrial de Santander

NOTA DEL PROYECTO DE GRADO | Mayo 19 /08

NOMBRE DEL ESTUDIANTE	CODIGO
NELSON ENRIQUE BARROS GALVIS	1973264

TITULO DEL PROYECTO:

"DISEÑO OPTIMO DE LAS TRAYECTORIAS DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL MEDIANTE INTELIGENCIA ARTIFICIAL. EN CASO DE OBTENER UNA TRAYECTORIA COSIDERESE LA FENOMENOLOGIA Y LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL LODO PARA INCREMENTAR EL TRANSPORTE DE SÓLIDOS Y LA LIMPIEZA DEL POZO"

Registros No.	FACULTAD	CARRERA
	CIENCIAS FISICO-QUIMICAS	ESCUELA INGENIERIA DE PETROLEOS

Calificación (letra y número)	Créditos
APROBADO	

Nombre del Director	Firma del Director
ING. ALVARO RAMIREZ	

Nombre del Co-Director	Firma del Director
ING. EDELBERTO HERNANDEZ	

CALIFICADORES

F	F
N	N
ING. FERNANDO CALVETE	ING. HUMBERTO ESCALANTE

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Alvaro Ramírez García, director de este trabajo de investigación.

Al director del Instituto Colombiano del Petróleo, Néstor Saavedra, codirector del trabajo

Al profesor Edelberto Hernández Trejos, codirector del trabajo.

A todas las personas que colaboraron y aportaron en el desarrollo de este trabajo.

DEDICATORIA

Allá en Barranquilla hay una viejita que siempre espera mi regreso con todo el cariño dedicado a ella, Angela.

A Pina por su valiosa paciencia.

Al Padre Celestial por ser mi guía y mi consejero.

Nelson

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	10
1. TRAYECTORIAS DIRECCIONALES DE LOS POZOS	12
1.1 PATRONES BÁSICOS DE TRAYECTORÍAS DE POZOS	12
1.1.1 Pozos Direccionales	13
1.1.2 Pozos Horizontales	14
1.2 MÉTODO DE LA MÍNIMA CURVATURA PARA CÁLCULOS DE TRAYECTORIAS DIRECCIONALES	14
1.2.1 Mínima curvatura	14
1.2.2 Dog leg Severo	16
1.3 SOFTWARE INTELIGENTE MEDIANTE ALGORITMOS GENETICOS	18
1.3.1 El concepto del algoritmo genético	18
1.3.2 La función objetivo	19
1.3.3 Conformación de la población inicial	20
1.3.4 Evaluación de la función objetivo	21
1.3.5 La selección cromosómica	21
1.3.6 Operadores de reproducción	23
1.3.7 Criterio de parada	23
1.4 LODOS BASE AGUA EMPLEADOS EN LA PERFORACION DE POZOS	24
1.5 TRANSPORTES DE SOLIDOS O RIPIOS EN LOS LODOS	24
1.6 VELOCIDAD DE TRANSPORTE DE SOLIDOS	25
1.7 MODELO MATEMATICO PARA EL CÁLCULO DE LA VELOCIDAD TERMINAL	26
1.7.1 Fuerzas involucradas en el transporte de los sólidos para el balance de cantidad de movimiento	26
1.7.2 Expresión matemática para determinar el coeficiente de empuje	28

1.7.3 Expresión matemática para determinar el coeficiente de dragado 29
1.8 PROPIEDADES DEL LODO DE PERFORACION 32
1.8.1 Composición del lodo base agua 32
1.8.2 La densidad 32
1.8.3 La alcalinidad 33
1.8.4 La tensión superficial 33
1.8.5 Viscosidad 33
2 DESARROLLO EXPERIMENTAL 34
2.1 DISEÑO DE TRAYECTORIAS DIRECCIONALES 34
2.2 APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS GENETICOS 35
2.3 SIMULACION DE TRAYECTORIAS 35
2.4 LA LIMPIEZA DEL POZO MEDIANTE UN FLUIDO DE PERFORACION 35
2.5 LA REOLOGIA 35
2.7 VELOCIDAD TERMINAL 36
2.8 MATERIALES 36
2.9 EQUIPOS 36
3 RESULTADOS Y ANALISIS 38
3.1 LIMITACIONES DEL TRABAJO DE INVESTIGACION 47
4. CONCLUSIONES 48
5 RECOMENDACIONES 49
6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 50
ANEXOS 52

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Pozos direccionales, tipos I, II y III respectivamente. 13

Figura 2. Pozo horizontal 14

Figura 3. Método de la mínima curvatura con su vectores unitarios $\underline{t_1}$ y $\underline{t_2}$ 16

Figura 4. Geometría de Mínima Curvatura entre dos puntos de inspección (Survey) 16

Figura 5. Método de la ruleta. 22

Figura 6. Espacio anular. 25

Figura 7. Diagrama de cuerpo libre de fuerzas 27

Figura 8. Diagrama de flujo del desarrollo experimental 34

Figura 9. Reporte gráfico de la trayectoria SAUDDITA. 39

Figura 10. Descripción de la trayectoria horizontal del simulador 42

Figura 11. Comportamiento reológico @ 30°C 44

Figura 12. Comportamiento reológico @ 40°C 44

Figura 13. Comportamiento reológico @ 50°C 45

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Reporte de datos del pozo horizontal real llamado SAUDDITA. 38

Tabla 2. Datos de la trayectoria simulada con GENTRAS 1.0 41

Tabla 3. Cálculos de velocidades terminales 46

LISTA DE ANEXOS

Pág.

ANEXO A. MANUAL DE USUARIO 53

RESUMEN

TITULO: DISEÑO ÓPTIMO DE LAS TRAYECTORIAS DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL MEDIANTE INTELIGENCIA ARTIFICIAL. EN CASO DE OBTENER UNA TRAYECTORIA HORIZONTAL CONSIDERESE LA FENOMENOLOGIA Y LAS PROPIEDADES FISICO QUIMICAS DEL LODO PARA INCREMENTAR EL TRANSPORTE DE SOLIDOS Y LA LIMPIEZA DEL POZO[*].

AUTOR
NELSON ENRIQUE BARROS GALVIS[**]

PALABRAS CLAVES
Algoritmo genético, velocidad terminal, reología, trayectoria de pozo, inteligencia artificial.

CONTENIDO

En este trabajo de investigación se desarrolló un simulador de trayectorias de perforación de pozos direccionales mediante inteligencia artificial, específicamente con algoritmos genéticos llamado GENTRAS 1.0. La característica fundamental de este simulador es la optimización de la trayectoria con respecto a la longitud para generar un impacto en el costo de la operación. Otra característica esencial en el software de perforación es el diseño flexible mediante rangos de valores en los datos de ingreso produciendo una rápida convergencia del programa computacional. Es importante mencionar que este programa fue validado con un caso real de perforación y desarrollado en la versión de Visual Fortran 90, Visual Basic 6.0 y una ventana de visualización en Visual C++.

En el desarrollo del proyecto investigativo se incluye un modelo matemático para el cálculo de la velocidad terminal de los sólidos o ripios en un fluido de perforación base agua dulce. Es de mencionar que el modelo matemático surge de datos reológicos con valores de viscosidad, densidad y se analiza una nueva propiedad que nunca se había considerado en los modelos anteriores que es la tensión superficial. Posteriormente se concluye la adición de químicos como la glicerina y el almidón de yuca como un modificador de la tensión superficial del lodo mejorando la limpieza del pozo. Este modelo conceptual para su aplicación industrial requiere de un seguimiento debido a limitaciones de los equipos de laboratorio.

---

[*] Trabajo de grado

[**] Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos e Ingeniería Química, Director. PhD. Alvaro Ramírez

SUMMARY

TITLE: OPTIMIZE DESIGN OF THE TRAJECTORIES OF DIRECTIONAL DRILLING USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE. IN CASE OF OBTAINING A HORIZONTAL TRAJECTORY CONSIDERS THE PHENOMENOLOGY AND THE PHYSICAL CHEMICAL PROPERTIES OF THE MUD TO INCREASE THE TRANSPORT OF CUTTINGS AND THE CLEANING OF THE WELL[*].

AUTHOR: NELSON ENRIQUE BARROS GALVIS[**]

KEY WORDS
Genetic algorithm, terminal speed, well trajectory, artificial intelligence.

ABSTRACT

In this investigation work a of trajectories of perforation of directional wells was developed by means of artificial intelligence, specifically using the genetic algorithm, called GENTRAS 1.0. The fundamental characteristic of this simulator is the optimization well trajectory with regard to the length to generate an impact in the cost of the operation. Another essential characteristic in the drilling software is the flexible design by means of ranges of values in the entrance data producing a quick convergence of the program. It is important to mention that this program have been validated with a real case of drilling and developed using Visual Fortran 90 language, Visual Basic 6.0 and a visualization window in Visual C++.

In the development of the investigative project a mathematical model is included for the calculation of the terminal speed of the solids or cuttings in a perforation fluid of fresh water. It is of mentioning that the mathematical pattern arises of rheologic data with values of viscosity, density and a new property is analyzed that had never been considered in the previous models that is the superficial tension. Later on, it concludes the addition of chemical as the glycerin and the yucca starch like a modifier of the superficial tension of the mud improving the cleaning of the well. This conceptual model for his industrial application requires of a pursuit due to limitations of the variable equipment or technology.

---

[*] Work of grade

[**] Faculty of Engineering physicochemical. Engineering School of Petroleum and Chemical Engineering, Director PhD. Alvaro Ramírez

INTRODUCCIÓN

En el país se evidencia una dificultad operacional en el planeamiento de trayectorias de perforación. La propuesta de crear un simulador inteligente de trayectorias direccionales se plantea como una herramienta auxiliar útil en el planeamiento de pozos. El desarrollo de este instrumento se fundamenta en los conceptos de inteligencia artificial, específicamente en la aplicación de los algoritmos genéticos y en el método de la mínima curvatura usado en el diseño de trayectorias direccionales. Tal hipótesis no se ha realizado en Colombia.

El objetivo de esta propuesta es diseñar trayectorias direccionales con implicaciones en el fluido de perforación empleado cuando se obtiene una trayectoria horizontal. Por tanto, este proyecto investigativo posibilita incrementar las reservas probadas de hidrocarburos en la medida que se perforen pozos direccionales, especialmente los horizontales debido a que estos pozos logran producir una mayor cantidad de hidrocarburos por su geometría y su radio de drenaje.

En el caso de obtener una trayectoria horizontal implica extraer los ripios o los sólidos producidos por el taladro a la superficie de una manera eficiente, en consecuencia se evidencia otro problema que tiene que ver con la limpieza del hueco y rotación misma del taladro generando dificultades y pérdida de tiempo en la operación cuyo efecto es un mayor costo. Uno de los objetivos de este trabajo de investigación es la solución del problema mencionado mediante la modificación de las propiedades de los lodos, estudiado su reología y adicionándole sustancias químicas al fluido de perforación para disminuir la velocidad terminal de los ripios, incrementar la tensión superficial en el lodo y lograr una mayor eficiencia en la limpieza del hueco.

Este simulador llamado GENTRAS 1.0 “Genetic Wellbore Trayectory Simulator es la primera herramienta en el país elaborada a través de algoritmos genéticos proporciona las bases para el diseño de trayectorias direccionales.

El primer problema planteado con el diseño de las trayectorias desde hace varios años se ha trabajado con métodos enumerativos de cálculo poco flexibles en la determinación de intervalos de perforación; el segundo problema relacionado con la limpieza de pozos, su antecedente de solución se ha centrado en el bombeo de lodo a altos caudales[1]. El valor agregado de esta tesis de grado es el diseño de trayectorias direccionales con rangos de operación y selección de trayectorias óptimas con respecto a su longitud, además se emplea la tensión superficial como ingrediente activo en la suspensión de los sólidos y limpieza del pozo.

Actualmente en el país, las herramientas computacionales que se han aplicado en el diseño de trayectorias son fundamentadas en el gradiente de una función objetivo e igualando a cero tales como PERFORM[2].

En este trabajo investigativo se concluye que la aplicación de los algoritmos genéticos produce diferentes alternativas de trayectorias optimizadas respecto a la longitud ofreciendo ventajas en los intervalos de perforación. Es de interés destacar, que la limpieza de un pozo horizontal se realiza manteniendo el modelo reológico pseudoplástico del lodo e incrementando la tensión superficial mediante el uso de almidones y glicerina.

[1] BERNT, Aadnoy. Modern Well Desing. Balkema /Rotterdam/ Brookfield.1999.

[2]ALDRED, W. D. Improving drilling efficiency through the application of PERFORM, performance by risk management. IADC, SPE paper 57574. Presented at the IADC/SPE Middle East Drilling Technology Conference, Abu Dhabi. United Arab Emirates. 8-10 November 1999.

1. TRAYECTORIAS DIRECCIONALES DE LOS POZOS

La perforación direccional tiene como propósito, la deflexión de un pozo de la vertical para seguir una trayectoria predeterminada hasta el objetivo. La necesidad de la perforación direccional es determinada por aspectos económicos y ambientales.

Las aplicaciones de la perforación direccional son variadas, una muy común es en locaciones offshore (costa afuera), pues en estos lugares varios pozos son perforados desde una única plataforma hacia diferentes localizaciones en el subsuelo. Este tipo de operaciones también aplica en locaciones difíciles de acceder en el subsuelo, como por ejemplo en áreas de domos salinos y en algunas operaciones de pesca. Pero, el crecimiento principal de las técnicas de perforación direccional ha sido en los pozos horizontales y perforaciones de alcance extendidos. Generalmente los pozos horizontales son realizados por razones económicas, la clave para el éxito de la perforación direccional de un pozo horizontal es el diseño de la trayectoria y el lodo que se implementará en la remoción de los sólidos.

En este capítulo se describen los patrones básicos que se emplean en la perforación direccional, posteriormente se conceptualiza sobre los algoritmos genéticos empleados como una técnica inteligente para el diseño de una trayectoria optimizada respecto a la longitud. Al final se analizan los conceptos teóricos del fluido de perforación base agua.

1.1 PATRONES BÁSICOS DE TRAYECTORÍAS DE POZOS

Las trayectorias de pozos están categorizadas en dos clases: los pozos direccionales y los pozos horizontales, el cual es un tipo especial de direccional.

1.1.1 Pozos Direccionales

Existen tres categorías básicas de geometrías de pozos; a) Pozos tipo I el cual es una trayectoria de aumento y mantenimiento del ángulo de inclinación, donde el pozo es deflectado de la vertical en algún punto (kick off point) y describe un ángulo, una vez es alcanzado este punto se mantiene hasta llegar al objetivo; b) Pozos tipo II estos siguen el esquema de construcción, mantenimiento y caída del ángulo de inclinación, se conocen como pozos de trayectoria “S” , se caracterizan por la deflexión de un ángulo dado, éste es mantenido hasta cierta profundidad y luego es nuevamente desviado hacia la vertical, es decir, el objetivo es alcanzado verticalmente. Existe una modificación del tipo II, la cual difiere en la terminación de la trayectoria, el objetivo es alcanzado con una inclinación diferente de noventa grados. c) Pozos tipo III, estos son verticales hasta cierta profundidad relativamente cercana al objetivo, luego inician la inclinación y penetran las formaciones de interés con altos ángulos. Ver figura 1.

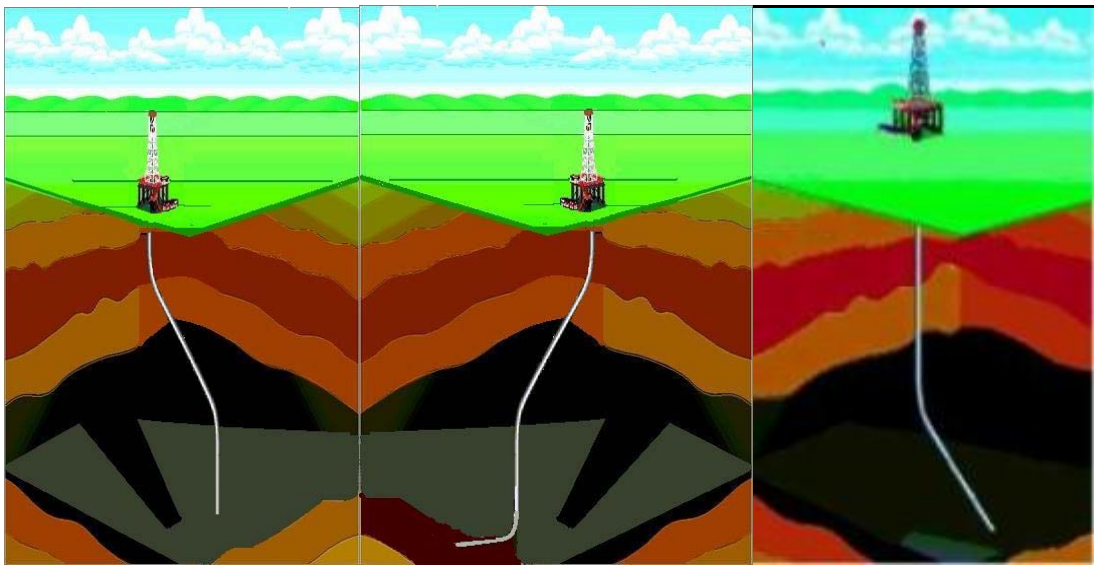


Figura 1. Pozos direccionales, tipos I, II y III respectivamente.

1.1.2 Pozos Horizontales

Incluyen aquellos pozos con ángulos de desviación cercanos a 90 grados, operacionalmente se obtienen ángulos mayores a 80 grados y son de alcance extendido, estas descripciones se pueden observar en la figura 2.

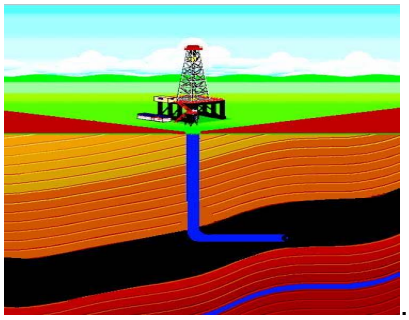
 .

Figura 2. Pozo horizontal

1.2 MÉTODO DE LA MÍNIMA CURVATURA PARA CÁLCULOS DE TRAYECTORIAS DIRECCIONALES

El método de la mínima curvatura ha surgido como un estándar en la industria para el cálculo de surveys direccionales en 3D. Este modelo representa la trayectoria del pozo mediante arcos circulares y líneas rectas. Con líneas, planos y series de puntos se representan características como pozos adyacentes, objetivos geológicos y fallas. El método de la mínima curvatura es una interpretación geométrica con un sencillo tratamiento matemático[3].

1.2.1 Mínima curvatura

El marco de referencia tradicional usado en trabajos direccionales usa las

[3] RABIA, OilWell Drilling Engineering Principles and Practices. Graham. 1985.

coordenadas Norte, Este y la profundidad como la vertical, las cuales comprenden un conjunto mutuamente ortogonal. Entonces un punto en el espacio N,E,V está representado por el vector $\underline{p}$ y se escribe así:

$$P = \begin{pmatrix} N \\ E \\ V \end{pmatrix} \qquad \text{Ecuación 1}$$

Un vector unitario $\underline{t}$ está dado en función de la inclinación θ y azimut ϕ local del pozo:

$$\underline{t} = \begin{bmatrix} \Delta N \\ \Delta E \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen}\theta\cos\phi \\ \text{sen}\theta\cos\phi \\ \cos\theta \end{bmatrix} \quad \text{..... Ecuación (2)}$$

A su vez la inclinación θ y azimut ϕ se pueden calcular a partir de las componentes de este vector:

$$\theta = \tan^{-1}\left[\frac{\left(\Delta N^2 + \Delta E^2\right)^{\frac{1}{2}}}{\Delta V}\right] \quad \text{..... Ecuación.3}$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta E}{\Delta V}\right) \quad \text{..... Ecuación 4}$$

Donde:

N: es la coordenada norte. (m)

E: es la coordenada este. (m)

V: es la profundidad. (ft)

Φ: azimut. (grados)

θ : inclinación (grados)

En el uso de las ecuaciones anteriores, implícitamente asume que la curvatura de la tierra en el espacio en que se realiza la trayectoria es despreciable. Para distancias mayores abarcadas por los pozos horizontales de alto alcance, se debe tener en cuenta esta inferencia. Ver figura 3 y 4.

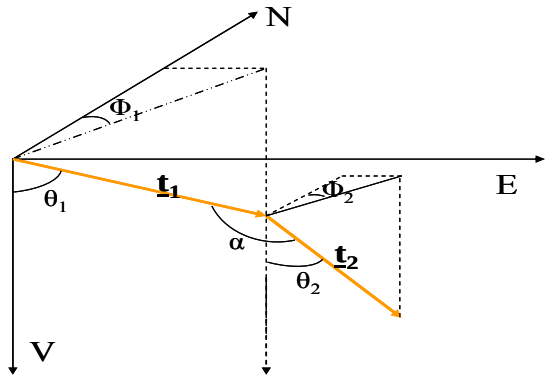


Figura 3. Método de la mínima curvatura con su vectores unitarios $\underline{t}_1$ y $\underline{t}_2$

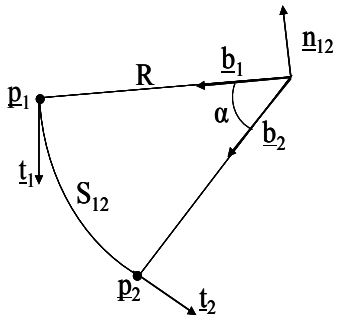


Figura 4. Geometría de Mínima Curvatura entre dos puntos de inspección (Survey)

1.2.2 Dog leg Severo

La tasa de cambio angular, llamada en perforación direccional dog leg severo, es la medida de cambio en la inclinación del pozo, este cambio se expresa en grados por cada cien pies de longitud perforada (grados/100ft) o en grados por cada 30 metros en el sistema métrico. Para el método de la mínima curvatura, la expresión que se utiliza para el cálculo de dog leg tiene la forma en unidades de campo:

$$D = \frac{\left(18000\,\frac{\alpha}{\pi}\right)}{(L_2 - L_1)}$$ ..... Ecuación (5)

D: dog leg (grados/100 ft)

α: desviación respecto a la trayectoria (grados)

Donde el término $(L_2 - L_1)$ llamado longitud de curso S_{12} es la diferencia entre dos profundidades en el diseño ó dos puntos de inspección en el seguimiento de la trayectoria durante la operación. Para el cálculo del arco α, se emplea el desarrollo realizado por Lubinski[3], la cual no hace alguna especificación sobre el patrón de pozo y además es matemáticamente equivalente con la expresión tradicionalmente usada en el método de la mínima curvatura. La manera en que se desarrolla esta expresión es utilizando la tangente del ángulo medio $\tan(\alpha/2)$ y adquiere la forma final:

$$\alpha = 2\text{sen}^{-1}\left\{\left[\text{sen}^2\left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}\right) + \text{sen}\theta_1\text{sen}\theta_2\text{sen}^2\left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2}\right)\right]^{\frac{1}{2}}\right\} \text{.....Ecuación.(6)}$$

El dog leg severo, está relacionado con el radio de curvatura y la curvatura κ de la siguiente manera:

$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{\alpha}{S_{12}} \text{ ..... Ecuación (7)}$$

k: curvatura (m^{-1})

La determinación precisa de la posición del pozo, es un factor crítico en el direccionamiento del mismo hasta el objetivo. Por esta razón se desarrolla la ecuación para el cálculo de las coordenadas de un punto de inspección precedido por otro punto. La posición $\underline{p}_2$ calculada a partir del punto $\underline{p}_1$ está dada empleando la identidad trigonométrica $\tan(\alpha/2) = (1 - \cos\alpha)/\text{sen}\alpha$ y conociendo que $S_{12} = R\alpha$, la expresión simple para el método de mínima curvatura es:

$$\underline{p}_2 = \underline{p}_1 + \frac{S_{12}}{\alpha}\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)(\underline{t}_2 + \underline{t}_1) \text{.....} \quad \text{Ecuación (8)}$$

t: es el vector unitario. (m)

p_1 y p_2: longitud de la trayectoria en un segmento de curva. (m)

S: es la longitud de arco. (ft)

Φ: azimut. (grados)

θ : inclinación (grados)

α: desviación respecto a la trayectoria (grados)

1.3 SOFTWARE INTELIGENTE MEDIANTE ALGORITMOS GENETICOS

La inteligencia artificial tiene varias áreas: algoritmos genéticos, redes neuronales y lógica difusa. Estos programas son un significativo adelanto en el mundo.

1.3.1 El concepto del algoritmo genético

El algoritmo genético es una técnica de optimización no convencional estocástica introducida por John Holland en 1975 inspirado en la analogía de la evolución y población genética, cuya ventaja y fortaleza es la ubicación de máximos o mínimos globales con un rango de búsqueda alto porque sencillamente combina e itera todos los valores de las variables de diseño y encuentra las mejores combinaciones para luego descartar las de menor aptitud ubicando un máximo dentro de una función objetivo. El gran detalle es, las trayectorias direccionales están sujetas a su viabilidad operacional, para ello se requieren parámetros que describan de manera heurística la operación. Vale la pena mencionar que Davis Golberg discípulo de John Holland es el maestro en los algoritmos genéticos y su técnica expuesta en su libro se aplica a cabalidad en este trabajo[4].

[4] GOLBERG, Davis. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley. Alabama. 5° Edition. 2005.

1.3.2 La función objetivo

El paso importante en la formulación de un modelo de optimización genética es determinar la función objetivo. Para este caso se fundamentará en el siguiente sistema de variables que se representa con las ecuaciones del método de la mínima curvatura[5].

TMD = (Dkop + D1 + D2 + D3 + D4 + D5 + HD) ……. Ecuación (9)

Donde:

Dkop: distancia o longitud desde la superficie hasta el punto donde inicia la curvatura en ft

HD: distancia horizontal en ft

D1, D2, D3, D4, D5: diferentes longitudes a lo largo de la trayectoria en ft

TMD: longitud total de la trayectoria. En ft

La función objetivo descrita en la ecuación 9, tiene un conjunto de variables y los términos descritos en esta ecuación se plantean como longitudes usando las ecuaciones 3, 5, 6, 7 y 8 respectivamente formando un sistema de ecuaciones para D1, D2, D3, D4 y D5. En el caso de HD y DKop son valores insertados de acuerdo a la viabilidad operacional y al conocimiento de la zona a perforar.

1.3.2.1 Pasos de la optimización de la función objetivo

La función objetivo expresa la longitud de la trayectoria. Matemáticamente la longitud de un segmento de curva de un radio y un ángulo de curvatura dado es $S_{12} = R\alpha$.

[5] RABIA, OilWell Drilling Engineering Principles and Practices. Graham. 1985.

Paso 1

La función objetivo descrita en la ecuación 9, tiene un grupo de variables donde cada término es una ecuación matemática produciendo un sistema. El sistema se conforma empleando la ecuación 8, sustituyendo S_{12} y el ángulo de desviación de la ecuación 6 de Lubinsky.

$$\underline{p}_2 = \underline{p}_1 + \frac{S_{12}}{\alpha}\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)(\underline{t}_2 + \underline{t}_1)$$

Donde p_2 expresa un término que se denominó D1 y análogamente se efectuó para D2, D3 y D4.

Paso 2

Se procede con la programación de la ecuación y se verifica que los valores de D1, D2, D3, D4 mantengan el mismo orden de magnitud respecto a las longitudes. Para proceder a linealizar y aditivar los términos de la ecuación y encontrar un valor de TMD resultante.

Paso 3

Se establecen unos valores de operatividad para acotar la función objetivo y delimitar la búsqueda aleatoria y obtener la mínima longitud de la trayectoria. Estos valores son datos de entrada.

1.3.3 Conformación de la población inicial

La población de un algoritmo genético está codificada en cromosomas seleccionada en números enteros. Cada variable o gen tendrá un valor aleatorio,

construido mediante una población generada aleatoriamente. El tamaño de la población seleccionada será de 100 cromosomas, donde cada cromosoma presentará una solución al problema.

1.3.4 Evaluación de la función objetivo

Después de construir la población inicial, cada cromosoma solución que es una trayectoria que resuelve el problema de optimización es evaluada de acuerdo a la función de aptitud que será el inverso de la función objetivo. La función de aptitud clasifica los buenos cromosomas o las buenas trayectorias de solución para descartar las peores. Tal función es:

Función de aptitud = 1000/(1000+TMD)

Donde:

TMD: función objetivo en ft de longitud.

C = 1000 una constante para una mayor precisión numérica de la función.

1.3.5 La selección cromosómica

La selección cromosómica esta basada en el método aleatorio de la ruleta. Este método selecciona aleatoriamente dos parientes cromosómicos de la población inicial para producir posteriormente dos hijos y reproducirlos, cada selección se efectúa de acuerdo a la aptitud del cromosoma; el cromosoma con mayor aptitud tendrá más opción de reproducirse.[6]

Se seleccionó este método porque es el más rápido en cuanto a tiempos de iteración. Para mayor comprensión se exhibe en la siguiente tabla y gráfico el método de la ruleta[7].

---

[6] GOLBERG, Davis. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley. Alabama. 5° Edition. 2005.

[7] *Ibid*.

N°	Cadena	Aptitud	% de aptitud total
1	01101	169	14.4
2	11000	576	49.2
3	01000	64	5.5
4	10011	361	30.9
Total	-------	1170	100.0

Descripción de acuerdo a la tabla del método de la ruleta.

Desde el punto de vista gráfico se nota que los cromosomas que tendrán mayor posibilidad de reproducirse son los de 49,2% en porcentaje total de aptitud. En consecuencia, la selección se efectuará en los de mayor porcentaje de aptitud que en este caso es el cromosoma número 2. Ver figura 5

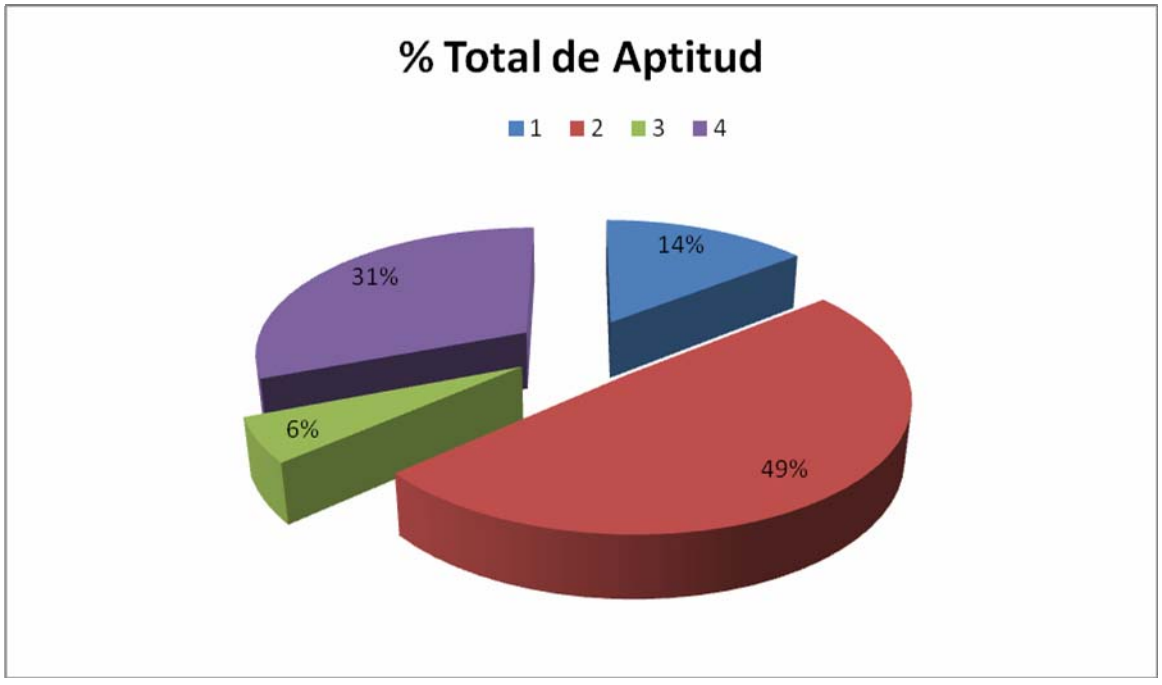


Figura 5. Método de la ruleta.

1.3.6 Operadores de reproducción

Se aplicaron dos operadores: el de cruce y el de mutación.

1.3.6.1 Cruce o crossover

El tipo de cruce que se empleó es el de un solo punto, el cual selecciona randómicamente el punto de corte del cromosoma. Es decir, toma un punto de la cadena cromosómica y divide el cromosoma en dos para luego reproducir cada parte.

1.3.6.2 Mutación e inserción

Posterior al cruce es la mutación, este operador se aplica cambiando el valor de la variable gen agregándole un nuevo valor aleatorio a la vieja variable.
Nuevo valor = viejo valor + (1-X) * valor aleatorio. ……Ecuación (10)
Donde: X opera entre cero y uno seleccionado de manera arbitraria por ser aleatorio. Se procede a evaluar cada gen mutado y los mejores genes se insertan en un cromosoma ya preestablecido para obtener una mejor solución. La inserción se hace copiando cada gen al cromosoma.

1.3.7 Criterio de parada

El criterio de parada está sujeto a la función de aptitud, cuando se obtengan las 10 mejores aptitudes se pararía la iteración de acuerdo a los rangos de valores en los datos de entrada o cuando cada cromosoma obtenga su máxima aptitud y no hallan modificaciones en ésta. Se debe tener presente que la aptitud, el cual es la función de evaluación del algoritmo y el inverso de la función objetivo se convierte en el criterio de selección para la mejor trayectoria con la menor longitud.

1.4 LODOS BASE AGUA EMPLEADOS EN LA PERFORACION DE POZOS

Siempre que se efectúa la perforación de un pozo es necesario u obligatorio seleccionar el lodo o fluido que se implementará en la limpieza del hueco o remoción de los sólidos. Vale la pena resaltar y mencionar que es imposible perforar un pozo sin un fluido de perforación[8]. Con base a la anterior premisa, se dispone a estudiar el transporte de los ripios en los lodos con la implicación de desarrollar y establecer mediante un balance de cantidad de movimiento un modelo matemático que determine la velocidad terminal del sólido en el fluido cuando los pozos son perforados direccionalmente. Posteriormente, se analizará la reología y las propiedades del fluido con un nuevo ingrediente que es la tensión superficial del lodo y su impacto en la limpieza del pozo.

1.5 TRANSPORTES DE SOLIDOS O RIPIOS EN LOS LODOS

La operación de perforación consiste en efectuar un hueco estable y permanente para obtener los hidrocarburos del yacimiento. Este tipo de operación se efectúa mediante un taladro, los sólidos o cortes de la broca son arrastrados por el lodo y expulsados por la zona anular de la tubería con el objetivo central de limpiar el fondo del pozo. Existen dos maneras de transportar los sólidos del pozo a la superficie; la primera tiene que ver con el aumento en el caudal del lodo mediante un fuerte bombeo considerando la hidráulica y la segunda involucra la capacidad de arrastre del lodo que implica la reología, la densidad y las propiedades del fluido; el cual es el tema de investigación en este trabajo.

Basándose en el principio de mantener la limpieza del fondo del pozo removiendo los sólidos por el anular; esta condición se satisface si se determina la mínima velocidad del fluido en el ánulo. Como el espacio anular entre la pared del hueco y

[8] LUBINSKI, Arthur. Developments in Petroleum Engineering. Volumen 1.1976.

la tubería es aproximadamente de 8 a 10 veces más pequeño que el diámetro del pozo, se justifica considerar la tensión superficial del lodo. Ver figura 6

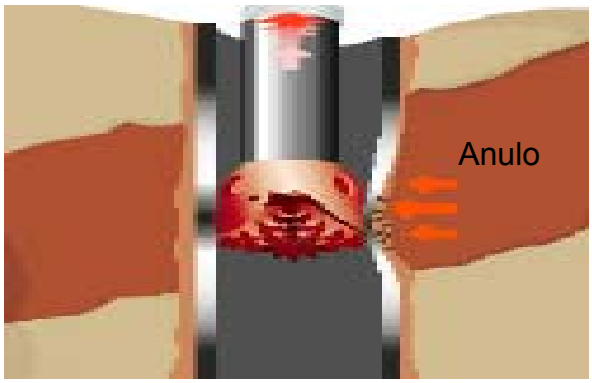


Figura 6. Espacio anular.

1.6 VELOCIDAD DE TRANSPORTE DE SOLIDOS

La mínima velocidad de transporte del fluido esta relacionada con la velocidad terminal de los sólidos. La determinación de las velocidades terminales y de sedimentación se deduce en el movimiento o caída libre de los cuerpos bajo la influencia de una fuerza externa (centrífuga o de gravedad) y se rige por la ley de Newton[9].

Los sólidos son transportados mediante arrastre o en suspensión durante la circulación del lodo. Normalmente, estos sólidos tienen una densidad que duplica la densidad del fluido, en consecuencia, si la velocidad terminal es alta los sólidos se ubicarán en el fondo del pozo y su limpieza será complicada, peor aún si es un pozo horizontal. Es posible encontrar ripios o cuttings en el fondo por su alto peso y alta velocidad terminal, en la medida que se controle esta variable se incrementaría la eficiencia en cuanto a la limpieza del pozo.

Para lograr transportar un ripio por arrastre se requiere un movimiento continuo del fluido, sin interferencias operacionales con una circulación permanente. Si se

[9] LEVENSPIEL, Octave. Fluidization Engineering. John Wiley. London.1975.

desea transportar por suspensión es necesario que el lodo este homogeneizado y los ripios sean de tamaños similares.

1.7 MODELO MATEMATICO PARA EL CÁLCULO DE LA VELOCIDAD TERMINAL

Cuando se obtiene un pozo desviado especialmente horizontal el transporte de los sólidos es más complejo que el de un pozo vertical. Los ripios se desplazan a través de un espacio anular inclinado que depende de la tasa de circulación, las propiedades del fluido, la tasa de flujo y la excentricidad de la tubería.

Debido al pequeño espesor del anular la velocidad de los cortes y la viscosidad efectiva del fluido varía considerablemente de manera radial y la fuerza de empuje o boyanza tiene poco efecto en el transporte porque su componente vertical es perpendicular al desplazamiento del lodo. El modelo planteado en este trabajo se establece bajo las siguientes simplificaciones:

1. Se asume que las fuerzas que actúan sobre las partículas no están influenciadas por las paredes del pozo.
2. Se considera un perfil de velocidad radial para determinar las fuerzas de dragado y el levantamiento de los sólidos.
3. Los sólidos no tienen interacción entre si, sólo están presentes las fuerzas que siente cada partícula.
4. Las partículas sólidas son esféricas para efectos de cálculo de la velocidad terminal.
5. Se tiene en cuenta el empuje que ejerce la tensión superficial en el ánulo.

1.7.1 Fuerzas involucradas en el transporte de los sólidos para el balance de cantidad de movimiento

El desplazamiento de los sólidos se efectúa de arriba hacia abajo o viceversa, según sea la densidad relativa del sólido con respecto al fluido. Por tanto, para

separar las partículas sólidas se requiere conocer las densidades y las velocidades de precipitación de éstos en el seno del fluido, cuya operación se conoce como separación hidráulica. Cuando una partícula de masa (m) y de densidad (ρ_s) cae en el seno de un fluido de densidad (ρ_f) bajo la influencia de la gravedad adquiere una cierta velocidad; en este fenómeno actúan las siguientes fuerzas: gravedad, fricción, tensión superficial, arrastre y dragado. Ver figura 6

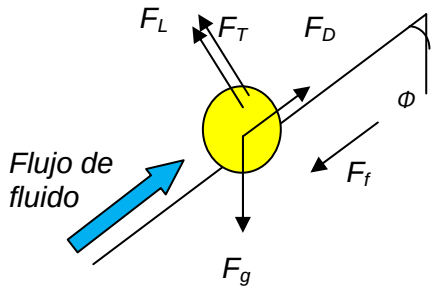


Figura 7. Diagrama de cuerpo libre de fuerzas

1.7.1.1 Fuerza externa debido a la gravedad

La fuerza de gravedad F_g actúa en los ripios y se puede expresar así:

$$F_g = V_s * (\rho_s - \rho_f) * g$$ Ecuación 11

1.7.1.2 Fuerza de fricción

Esta relacionada con la fricción efectiva de los sólidos con la pared del pozo. Se expresión es:

$$F_f = f[V_S * (\rho_S - \rho_f) * g * sen\phi - F_L]$$ Ecuación 12

1.7.1.3 Fuerza de empuje

La fuerza de empuje se ejerce de manera perpendicular al eje de flujo de fluidos y tiende a suspender los sólidos hacia la pared lateral del anular. Considerando lo anterior se puede establecer dos flujos; el primero, laminar debido a la distribución asimétrica de la distribución de velocidad y el segundo turbulento por las

fluctuaciones de velocidad instantánea en el ánulo. La fuerza de empuje puede expresarse: $F_L = \frac{1}{2} C_L * A_L * \rho_f * V_{SL}^2 + F_T$ Ecuación 13

1.7.1.4 Fuerza de arrastre

Esta fuerza actúa paralela al eje de flujo del fluido, es el resultado de la viscosidad y de la presión de dragado que le imprime el fluido a la partícula. Su expresión matemática:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D * A_D * \rho_f * V_{SL}^2$$ Ecuación 14

1.7.1.5 Fuerza producida por la tensión superficial

La elevación del líquido a través del espacio anular tiene relación con la componente de la tensión superficial y su ángulo de contacto β, el cual tiene valores cercanos a cero por ser un lodo base agua. Esta fuerza tiene influencia en el coeficiente de empuje del fluido.

$$F_T = \sigma \pi D cos\beta$$ Ecuación 15

1.7.2 Expresión matemática para determinar el coeficiente de empuje

Cuando existe un ángulo de inclinación entre la vertical y la horizontal, las fuerzas que contribuyen en la suspensión de los sólidos son las fuerzas de empuje y las de arrastre, de acuerdo a lo anterior efectuando un balance respecto al eje vertical:

$$F_D cos(\phi) - F_L sen(\phi) = F_g$$ Ecuación 16

En el momento en que los sólidos están suspendidos la fuerza de fricción es cero y la fuerza de dragado o arrastre se equilibra con la componente axial de la gravedad.

$$F_D = F_g * cos(\phi)$$ Ecuación 17

Sustituyendo la ecuación 7 en 6 se obtiene

$$F_L = F_g * sen(\phi)$$ Ecuación 18

Reemplazando cada término de esta ecuación por las expresiones 1, 2, 3 y 4

$$\frac{1}{2} * C_L * A_L * \rho_f * V_{SL}^2 + F_T = V_s * (\rho_s - \rho_f) * g * sen(\phi)$$ Ecuación 19

Asumiendo que las partículas son esféricas y considerando su área, el coeficiente de empuje es:

$$C_L = \frac{4 * d_s * \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1.0\right) * g * sen(\phi) - F_T}{3 * V_{SL}^2}$$ Ecuación 20

1.7.3 Expresión matemática para determinar el coeficiente de dragado

Para evaluar el deslizamiento de los cortes de roca en un pozo inclinado la fuerza de arrastre tendrá dos componentes: una axial que tiene que ver con la gravedad y la otra que es generada por la fricción de los sólidos con la pared de la tubería. Cuyo balance es:

$$F_D = F_g * cos(\phi) + F_f$$ Ecuación 21

Sustituyendo la ecuación 1,2 y 3 en el balance se logra una expresión que define el coeficiente de arrastre para sólidos que se deslizan en el anular.

$$C_D = \frac{4 * d_s * \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1.0\right) * g * (cos(\Phi - sen(\phi))}{3 * V_{SL}^2} - C_L$$ Ecuación 22

Reemplazando C_L en la ecuación anterior se obtiene la ecuación 23:

$$C_D = \frac{4 * d_s * \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1.0\right) * g * (\cos(\phi) - \text{sen}(\phi))}{3 * V_{SL}^2} - \frac{4 * d_s * \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1.0\right) * g * \text{sen}(\phi) - F_T}{3 * V_{SL}^2}$$

En consecuencia, la siguiente expresión para hallar la velocidad terminal se resuelve mediante un ensayo error produciendo valores poco aproximados.

$$V_{SL} = \sqrt{\frac{4 * d_s * \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1.0\right) * g * (\cos(\phi) - sen(\phi)) - 4 * d_s * \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1.0\right) * g * sen(\phi) - F_T}{3 C_D}}$$ Ecuación 24

Esta ecuación se puede usar para calcular la velocidad terminal en flujo laminar, de transición o turbulento; si C_D es evaluado. Pero el coeficiente de arrastre (C_D) es función de la velocidad, resultando una ecuación con dos incógnitas. La segunda ecuación para la solución sería un gráfico que relacione C_D con el número de Reynolds (Re), el cual es un proceso iterativo de tanteo que se debe evitar por su poca precisión.

Si el número de Reynolds (Re) se multiplica por la raíz cuadrada de C_D, se obtiene una expresión que no depende de la velocidad terminal y se evitan todas las iteraciones, para mayor comprensión obsérvese este bello planteamiento matemático.

Si $N = \mathrm{Re}\sqrt{C_D}$ y $\mathbf{Re} = \frac{d_s V_{SL} \rho}{u}$, asumiendo que la máxima velocidad del sólido es la velocidad del lodo o líquido y reemplazando la constante adimensional N, se logra:

$$\mathbf{N} = \left[\frac{d_s V_{SL} \rho_f}{u}\right]\left[\frac{1}{V_{SL}}\sqrt{\frac{4 * d_s * \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1.0\right) * g * (\cos(\phi) - 2\mathrm{sen}(\phi)) - F_T}{3}}\right] \qquad \text{Ecuación 25}$$

$$\mathbf{N} = \left[\frac{d_s \rho_f}{u}\right]\left[\sqrt{\frac{4 * d_s * \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1.0\right) * g * (\cos(\phi) - 2\mathrm{sen}(\phi)) - (F_T)}{3}}\right] \qquad \text{Ecuación 26}$$

Si se sustituye el coeficiente adimensional C_D mediante la expresión adimensional llamada N en la ecuación 16 se logra lo siguiente:

$$V_{SL} = \sqrt{\frac{4 * d_s * \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1.0\right) * g * (\cos(\phi) - 2\mathrm{sen}(\phi)) - F_T}{3\left(\frac{N}{\mathrm{Re}}\right)\rho_f}} \qquad \text{Ecuación 27}$$

Conociendo el factor N que se determinó matemáticamente, las propiedades del fluido y las propiedades del sólido obtenido en la operación de perforación, se

determinaría la velocidad Terminal directamente sin ningún procedimiento de tanteo para un pozo direccional. A continuación se mencionan las variables usadas en el balance con sus respectivas unidades:

A_L: área proyectada del sólido perpendicular a la dirección de flujo. (m^2)

A_D: área proyectada del sólido en dirección paralela al flujo. (m^2)

C_D: coeficiente de arrastre adimensional

C_L: coeficiente de arrastre adimensional

d_S: diámetro de partícula esférica.(m)

f: coeficiente de fricción entre el ripio y la pared del hueco. Adimensional

F_D: fuerza de dragado. (N).

F_f: fuerza de fricción. (N)

F_g: fuerza de gravedad. (N)

F_g: fuerza de empuje. (N)

g: constante gravitacional. 9.81 m/s^2

β: ángulo de contacto, entre el fluido y el anulo de la tubería. (grados)

h: altura del líquido en metros (m)

ρ_f: densidad del lodo o fluido. (kg/m^3)

σ: tensión superficial. N/m

r: radio del capilar o espacio anular en metros (m)

D: diámetro del espacio anular en metros (m)

m: masa de la partícula. (kg)

Re: número adimensional de Reynolds

ρ_s: densidad del sólido. (kg/m^3)

u: viscosidad del fluido. ($N*s/m^2$)

$V_{SL:}$ velocidad terminal del sólido en el líquido

N: número algebraico adimensional coyuntural

π: 3.14159 adimensional

Φ : ángulo de inclinación. (grados)

Con esta expresión matemática se ha planteado un nuevo modelo matemático para determinar la velocidad terminal, siendo una herramienta útil en la limpieza del pozo.

1.8 PROPIEDADES DEL LODO DE PERFORACION

En un lodo de perforación base agua es vital la suspensión de los cortes de roca en el fluido. En este estudio de investigación se analizó las propiedades más influyentes en la suspensión de los sólidos. Tales propiedades son: la densidad, la viscosidad y la tensión superficial entre otras.

1.8.1 Composición del lodo base agua

De acuerdo al tipo de agua, existen dos tipos de lodo, en esencia; están compuestos por bentonita (arcilla), barita (arcilla), hidróxido de sodio y agua que puede ser dulce o salada con contenido de cloruro de sodio.

1.8.2 La densidad

Entendida como la relación entre la masa y el volumen, tiene una influencia directa en el transporte de los sólidos. Las densidades que se manejan en un fluido de perforación normalmente oscilan entre 9 lb/gal hasta 13 lb/gal. Esta propiedad además de transportar los ripios cumple con el objetivo de contralar la presión hidrostática del yacimiento. Bajo la anterior inferencia se podría argumentar el empleo de lodos con densidades altas mayores de 10.5 lb/gal, pero este tipo de fluidos invaden el yacimiento produciendo un daño o taponamiento.

1.8.3 La alcalinidad

El control del pH del fluido se realiza mediante la adicción de NaOH en los lodos, el hidróxido de sodio actúa como dispersante. El término dispersante tiene dos significados en la tecnología del lodo, en un sentido, es sinónimo con la disminución de la viscosidad y del gel strengths, en el otro se refiere a la ruptura de partículas y a un aumento en el área de superficie de la fase dispersa. Se cree que los rangos de pH en un fluido base agua debe ser entre 9 - 10.

1.8.4 La tensión superficial

La interfase entre un líquido y un gas se comporta como si fuera una membrana elástica estirada; la fuerza contráctil de esta membrana imaginaria se conoce como tensión superficial. El método más común para medir la tensión superficial es el uso del tensiómetro de DuNouy, el cual mide la fuerza requerida para empujar un anillo de platino a través de la superficie de un líquido.

1.8.5 Viscosidad

El concepto de viscosidad está relacionado con la resistencia interna al flujo, en el caso de los lodos la variación de la deformación respecto al esfuerzo de corte está ligado al tipo y contenido de sólidos que constituyen al fluido. Con la reología se puede definir la capacidad de transporte y suspensión de los sólidos, además de los parámetros operacionales en el bombeo del fluido.

En la industria perforadora el modelo no newtoniano en estado estacionario que se prefiere es el de Ostwald de Waele, específicamente, el comportamiento pseudoplástico, cuya ecuación de dos parámetros se conoce con el nombre de la ley de la potencia.

2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se puede describir la metodología del trabajo mediante el siguiente diagrama de bloques:

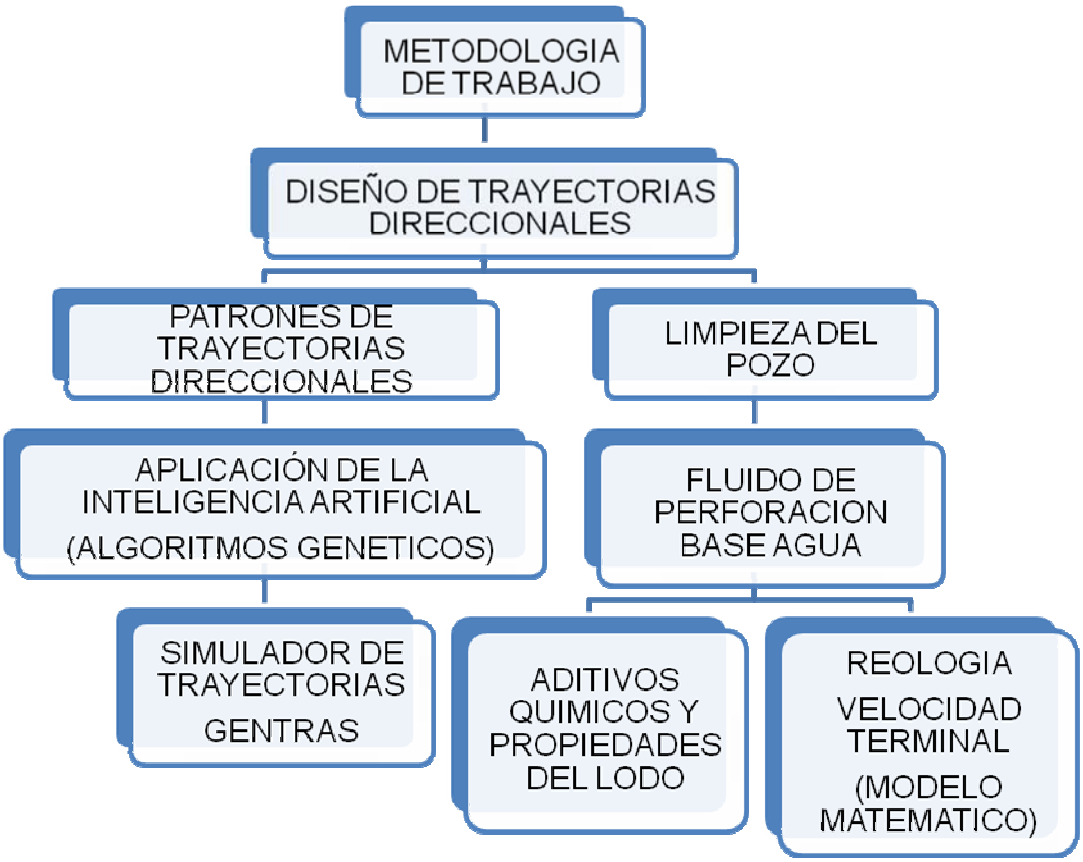

METODOLOGIA DE TRABAJO
DISEÑO DE TRAYECTORIAS DIRECCIONALES
PATRONES DE TRAYECTORIAS DIRECCIONALES
LIMPIEZA DEL POZO
APLICACIÓN DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL (ALGORITMOS GENETICOS)
FLUIDO DE PERFORACION BASE AGUA
SIMULADOR DE TRAYECTORIAS GENTRAS
ADITIVOS QUIMICOS Y PROPIEDADES DEL LODO
REOLOGIA VELOCIDAD TERMINAL (MODELO MATEMATICO)

Figura 8. Diagrama de flujo del desarrollo experimental

2.1 DISEÑO DE TRAYECTORIAS DIRECCIONALES

Por ser un simulador computacional se implementó el método teórico de la mínima curvatura mediante la ecuación del ángulo de desviación. Posteriormente se analizaron las variables de entrada del programa y sus variables de salida mediante las ecuaciones ya descritas en el capítulo de conceptos teóricos. Tales ecuaciones son: ecuación 28, 29 y 30.

2.2 APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS GENETICOS

A las ecuaciones anteriores se aplican los conceptos de algoritmo genético, el cual combina, itera y reemplaza valores de manera aleatoria para hallar un máximo global. Efectuando 107.000.000 de iteraciones mediante una búsqueda exhaustiva.

2.3 SIMULACION DE TRAYECTORIAS

El simulador de trayectorias se desarrolló en FORTRAN 90 por los requisitos de potencia en las iteraciones, en lo que compete al ingreso de datos se efectuó una interfaz visual en Visual Basic y la interfaz de salida en Visual C++. Tres lenguajes de programación se fusionan para considerar las variables de entrada como los azimut, coordenadas del objetivo y superficie, ángulo de desviación, dog leg y radio de curvatura como parámetros iniciales de iteración y entregar los mismas variables de entrada optimizada en rangos operacionales para obtener una trayectoria direccional.

2.4 LA LIMPIEZA DEL POZO MEDIANTE UN FLUIDO DE PERFORACION

Una vez diseñada una trayectoria direccional especialmente horizontal es necesario el diseño de un flluido de perforación. Diseñó un fluido convencional como muestra guía estudiando sus propiedades y su comportamiento reológico.

2.5 LA REOLOGIA

Con el lodo guía que fue el lodo1 de densidad predeterminada se trazó una curva viscosimétrica y se decidió el modelo reológico. Manteniendo las características de ese modelo reológico se procedió aditivar la muestra guía con glicerina y almidón

de yuca observando los mayores y menores valores de viscosidad y su variación con la temperatura.

2.7 VELOCIDAD TERMINAL

Una vez reportada la curva reológica, la densidad, la tensión superficial; se determina la viscosidad pero antes es necesario crear un modelo matemático para considerar el efecto de la tensión en trayectorias inclinadas. El término crear implica desarrollar un método que no existe, partiendo de conceptos básicos ingenieriles para elaborarlo.

2.8 MATERIALES

Arcillas: bentonita prehidrata y barita
Agua dulce
Hidróxido de Sodio
Almidón de yuca de fabricación casera, denominado aditivo 1
Glicerina
Muestras de lodo
Lodo 1: arcillas, agua dulce e hidróxido de sodio
Lodo 2: arcillas, agua dulce, hidróxido de sodio y glicerina
Lodo 3: arcillas, agua dulce, hidróxido de sodio y almidón
Lodo 4: arcillas, agua dulce, hidróxido de sodio, almidón y glicerina
Respecto a los contenidos de almidón, glicerina o su mezcla se agrega el 10% del volumen del lodo base, el cual es el lodo 1.

2.9 EQUIPOS

Balanza y un agitador para la preparación de los cuatro lodos.
Viscosímetro: de alta confidencialidad en el instituto no se conoce el procedimiento ni información por ser un equipo patentado y confidencial.

Tensiómetro y medidor de pH: de alta confidencialidad en los laboratorios del Instituto Colombiano del Petróleo.

3 RESULTADOS Y ANALISIS

Se comparó la trayectoria de GENTRAS 1.0 con los datos de un pozo horizontal real llamado SAUDDITA. Ver figura 9, 10 y las tablas de datos del pozo horizontal real y los resultados que arroja el simulador.

Sec	TVD (ft)	MD (ft)	Inclinación (Grados)	Azimut (Grados)
1	0.0	0.00	0.00	0.00
2	600	600	0.00	0.00
3	1097.47	1100	10.00	190.66
4	1394.98	1402.10	10.00	190.66
5	2350.12	2654.68	65.11	190.72
6	2486.93	2979.79	80.22	191.19
7	2618.00	3527.07	80.22	191.19
8	2622.28	3647.07	87.00	191.19
9	2626.90	3747.07	90.00	191.19
10	2626.91	5048.98	90.00	191.19
Coordenadas de Target: N: 910560 y E: 1294264 Coordenadas del Surface: N: 909610 y E: 1294080				

Tabla 1. Reporte de datos del pozo horizontal real llamado SAUDDITA.

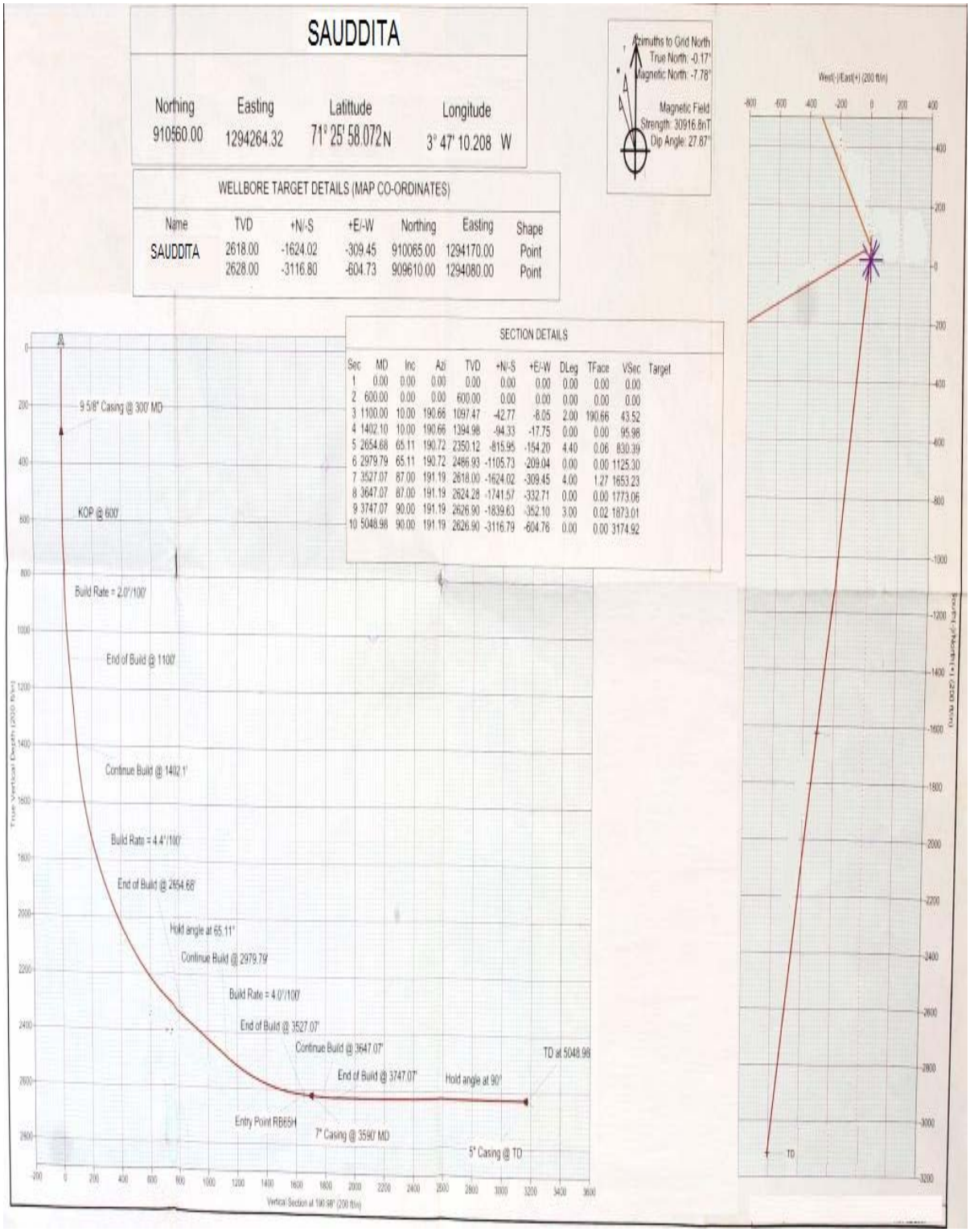


Figura 9. Reporte gráfico de la trayectoria SAUDDITA.

Los datos que arroja GENTRAS 1.0 son los siguientes:

BASIC DATE OF TRAYECTORY			
COLUMN 1: TRUE VERTICAL DEPTH (TVD)(ft)			
COLUMN 2: TRUE MEASURED DEPTH (TMD)(ft)			
COLUMN 3: AZIMUTH - ZONE 1 (TETA_UNO) (GRADES)			
COLUMN 4: INCLINATION ANGLE (FI) (GRADES) FI			
FITNESS GENETIC: 0.1009978			
COLUMN 1	**COLUMN 2**	**COLUMN 3**	**COLUMN 4**
0.000E+00	0.000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
100.0000	100.0000	0.0000000E+00	0.0000000E+00
200.0000	200.0000	0.0000000E+00	0.0000000E+00
300.0000	300.0000	0.0000000E+00	0.0000000E+00
400.0000	400.0000	0.0000000E+00	0.0000000E+00
500.0000	500.0000	0.0000000E+00	0.0000000E+00
600.0000	600.0000	0.0000000E+00	0.0000000E+00
660.0000	660.0000	0.0000000E+00	0.0000000E+00
699.9755	700.0000	194.2516	2.839206
799.6688	800.0000	194.2516	5.678412
898.8719	900.0000	194.2516	8.517618
997.3414	1000.000	194.2516	11.35682
1094.836	1100.000	194.2516	14.19603
1191.115	1200.000	194.2516	17.03524
1285.943	1300.000	194.2516	19.87444
1379.087	1400.000	194.2516	22.71365
1470.319	1500.000	194.2516	25.55286
1559.414	1600.000	194.2516	28.39206
1646.154	1700.000	194.2516	31.23127

1730.325	1800.000	194.2516	34.07047
1811.722	1900.000	194.2516	36.90968
1890.144	2000.000	194.2516	39.74889
1965.399	2100.000	194.2516	42.58809
2037.301	2200.000	194.2516	45.42730
2105.675	2300.000	194.2516	48.26651
2170.353	2400.000	194.2516	51.10571
2231.175	2500.000	194.2516	53.94492
2287.993	2600.000	194.2516	56.78413
2340.667	2700.000	194.2516	59.62333
2389.067	2800.000	194.2516	62.46254
2433.076	2900.000	194.2516	65.30174
2472.584	3000.000	194.2516	68.14095
2507.495	3100.000	194.2516	70.98016
2537.723	3200.000	194.2516	73.81936
2563.194	3300.000	194.2516	76.65857
2583.845	3400.000	194.2516	79.49777
2599.626	3500.000	194.2516	82.33698
2610.498	3600.000	194.2516	85.17619
2616.434	3700.000	194.2516	88.01540
2621.166	5020.000	194.2516	88.12370
Coordenadas de Target:		**N: 910560.000**	**E: 1294264.000**
Coordenadas del Surface:		**N: 909610**	**E: 1294080**

Tabla 2. Datos de la trayectoria simulada con GENTRAS 1.0

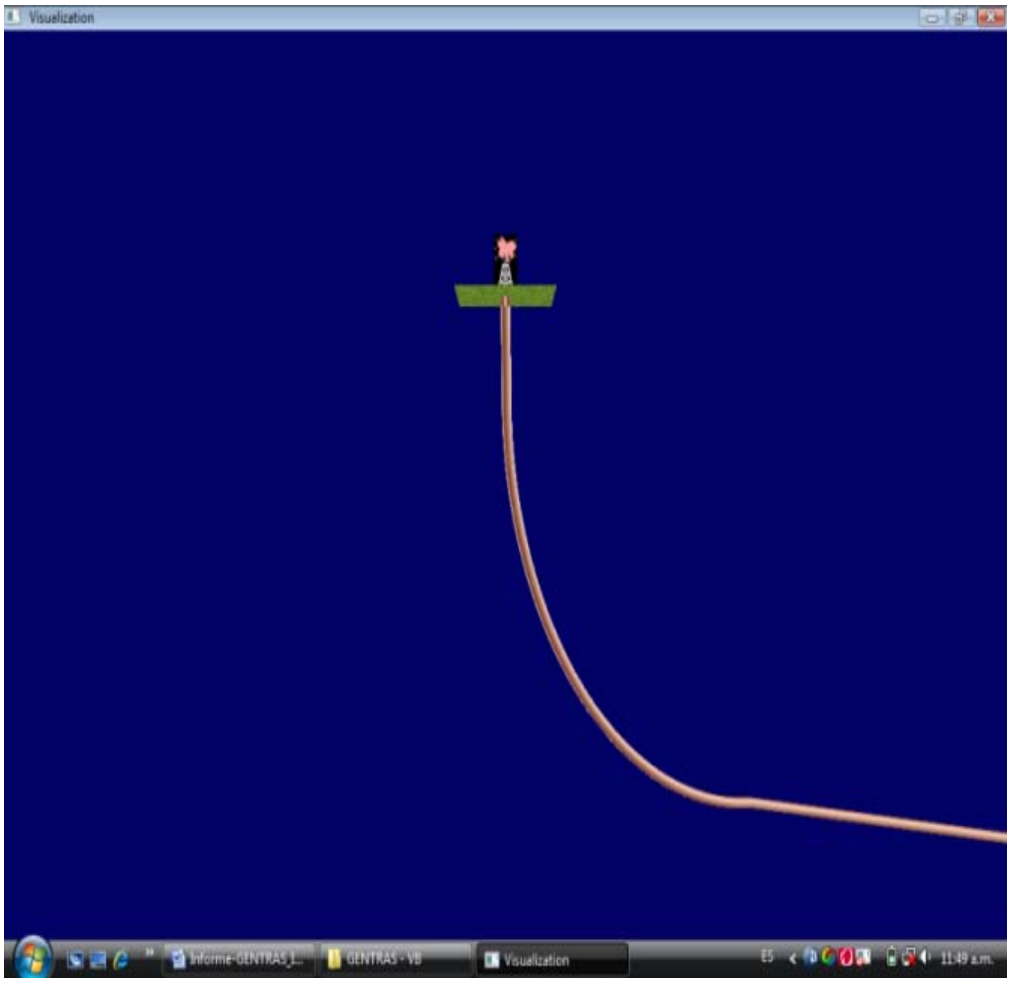


Figura 10. Descripción de la trayectoria horizontal del simulador

Comparando con la trayectoria SAUDDITA y respecto al patrón de trayectoria direccional trazado por el simulador es el mismo, en consecuencia es una trayectoria horizontal; lo cual es un buen indicador del programa en el modelo de trayectorias. Desde el punto de vista de la presición de los datos arrojados el simulador GENTRAS 1.0 obtiene una trayectoria de menor longitud. Este resultado es lógico y esperado debido a que la optimizacón mediante algoritmos genéticos consiste en hallar la mínima longitud o el mínimo global de la función objetivo. En la medida que no existan problemas operacionales se considera que la trayectoria más corta tiene un menor costo.

En lo que compete al ángulo de desviación el software entrega un ángulo cercano a 90° como valor de convergencia del algoritmo. Si un criterio de comparación fuese el ángulo de deflexión el error relativo de Gentras 1.0 respecto a la trayectoria real SAUDDITA es de 2.129%.

Una de las características de GENTRAS 1.0 es su flexibilidad en cuanto al ingreso de datos establecido mediante rangos operacionales para acotar la función objetivo. Este simulador entrega un conjunto de trayectorias con valores operacionales viables en este caso son diez (10) trayectorias. La selección de la trayectoria se realiza a través de la función aptitud. La trayectoria de mayor aptitud ofrece menor longitud en consecuencia tiene prioridad; pero como el objetivo en el grupo de investigación es efectuar un estudio geomecánico de la estabilidad de la trayectoria es válido estimar que aquella trayectoria que ofrezca la mayor estabilidad, es decir, menor problema operacional será la seleccionada.

Puede leerse el manual de usuario del simulador para corroborar la existencia de este software o trabajo de investigación.

Obsérvese el siguiente resultado de manera gráfica para los lodos de perforación (Ver figura 11, 12 y 13).

Muestras de lodo

Lodo 1: arcillas, agua dulce e hidróxido de sodio
Lodo 2: arcillas, agua dulce, hidróxido de sodio y glicerina
Lodo 3: arcillas, agua dulce, hidróxido de sodio y almidón
Lodo 4: arcillas, agua dulce, hidróxido de sodio, almidón y glicerina
Respecto a los contenidos de almidón, glicerina o su mezcla se agrega el 10% del volumen del lodo base, el cual es el lodo 1.

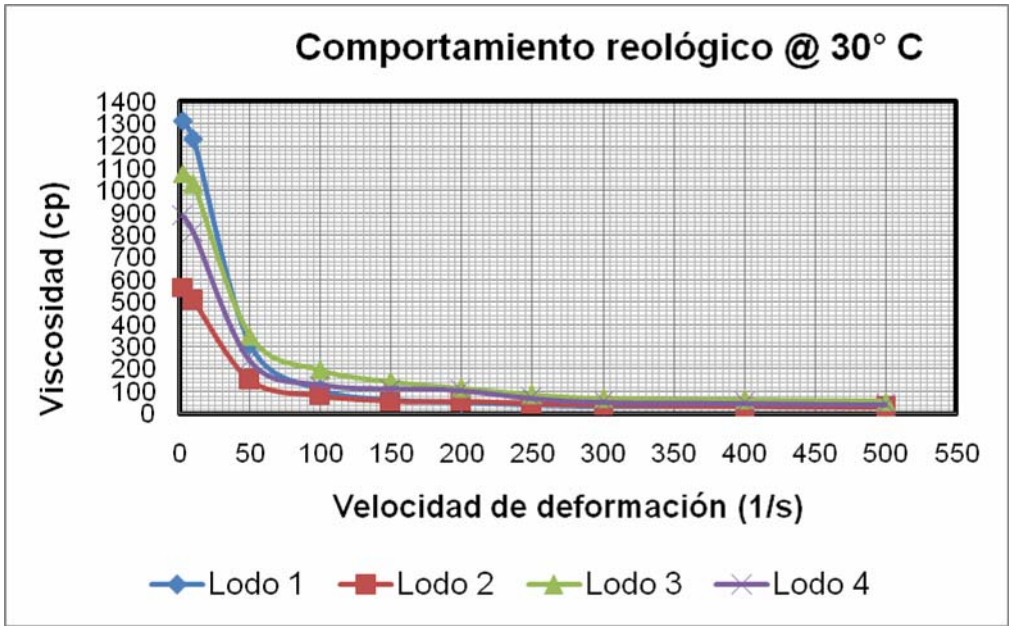


Figura 11. Comportamiento reológico @ 30°C

La figura 11 presenta el comportamiento de cuatro fluidos de perforación, sin excepción las muestras evaluadas tienen un comportamiento pseudoplástico, principalmente en el rango de velocidad de deformación entre 3 y 250 s^{-1}. A partir de 250 la viscosidad resultó más estable cercana al comportamiento newtoniano.

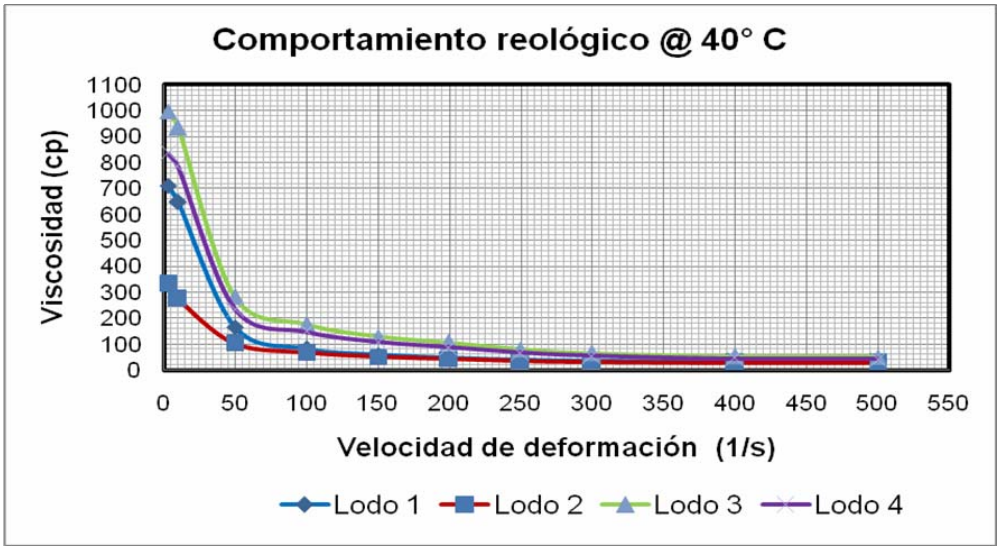


Figura 12. Comportamiento reológico @ 40°C

Considerándose el efecto de la velocidad de deformación, en la figura 12 se observa un comportamiento pseudoplástico en las muestras similar al de la figura anterior. La diferencia radica en la estabilización o en la cercanía al modelo newtoniano a partir de 300 s^{-1}. El efecto de la temperatura se evidencia en el lodo 3 debido a la rápida hidratación del aditivo e incremento de la energía cinética alterando la disposición y orientación de las partículas en dirección al cizallamiento, en consecuencia, una mayor viscosidad. Respecto a las otras muestras se presenta una esperada disminución de la viscosidad, es de anotar que el descenso de la viscosidad del fluido 1es abrupto.

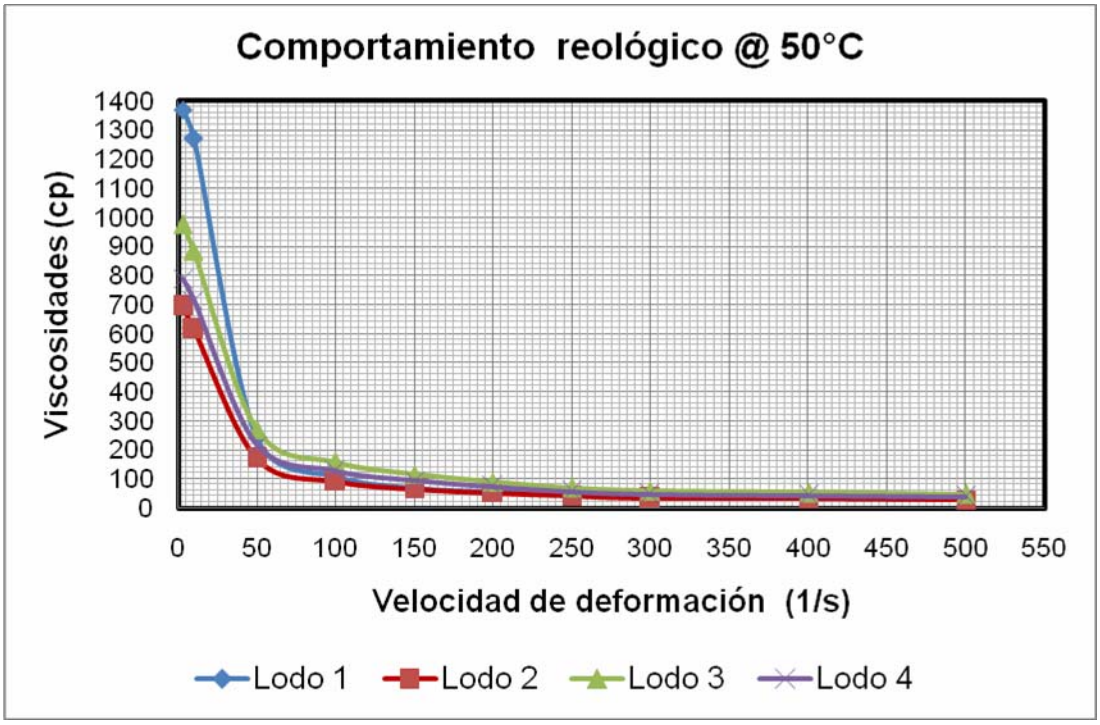


Figura 13. Comportamiento reológico @ 50°C

De igual manera, la figura 13 exhibe el efecto de la temperatura en el lodo 1, en el intervalo de 40°C y 50°C, pero la razón de cambio de la viscosidad es alta. Estudiando los resultados se concluye que el mejor modelo para un lodo base agua es el pseudoplástico porque se requiere un menor consumo de energía o desgaste de la bomba una vez se deforme el fluido y se perfora el pozo.

Los aditivos que se le deben agregar a un pozo para mejorar la limpieza del hueco corresponde a la mezcla de glicerina y galactosa contenidas en el lodo 4, por las siguientes observaciones:

1. El comportamiento reológico es pseudoplástico
2. No presenta efecto de orientación de las moléculas durante la fluctuación de temperatura.
3. Incrementan la tensión superficial del fluido
4. Los valores de viscosidad inicial son más bajos comparados con los otros lodos, por tanto, se requiere una bomba de menor capacidad y ahorro en costos.

Propiedades	Lodo 1	Lodo 2	Lodo 3	Lodo 4
Tensión superficial @ 27°C. (N/m)	0.1212	0.0831	0.2965	0.2102
Viscosidad @ 30°C y 50 s^{-1}. *(cp)*	302	146	384	271
Densidad @ 30°C (g/cc)	1.115	1.121	1.118	1.122
Velocidad terminal del sólido en el líquido. (m/s)	1.147	1.334	0.840	0.911

Tabla 3. Cálculos de velocidades terminales

Los valores de tensión superficial guardan un impacto directo en la velocidad terminal del sólido porque empujan y suspenden el sólido, en efecto, los sólidos tardarán más tiempo en depositarse en el fondo y hay una mayor posibilidad de limpieza mediante el bombeo de lodo que debe tener una velocidad mayor a la velocidad terminal de los sólidos. Esto también se puede apreciar en fotografías de lodos tomadas en el laboratorio. Con ello se da un paso en la solución de una problemática en la limpieza de los pozos y se logra saber cuales son los caudales que debe implementarse en la bomba, para no sobre diseñar el bombeo con consecuencias en un mayor costo de la operación. Estos datos se efectuaron

considerando un espacio anular de 1 cm, con carbones de densidad de 2,212 g/cc con diámetro de partícula de 0.5 cm, pH de los lodos de 9 y con un ángulo de inclinación del pozo de 90°. Es evidente que el modelo matemático produce resultados y es generalizado para cualquier ángulo de inclinación, es decir, se puede probar con cualquier patrón de trayectoria; algo que inicialmente no se había previsto en este trabajo de investigación que sólo se pretendía aplicar a pozos horizontales con ángulo de inclinación de 90°

3.1 LIMITACIONES DEL TRABAJO DE INVESTIGACION

- La manera contundente para establecer un concepto respecto al uso y precisión del simulador es perforando una trayectoria arrojada por el software en campo. Existen comparaciones como con el caso real SAUDDITA con aproximaciones en datos que pueden o no satisfacer, pero esa es la razón esencial de un trabajo de investigación.

- Es necesario realizar pruebas reológicas al lodo de perforación base agua con los aditivos propuestos con incrementos en la presión y en la temperatura simulando las condiciones de un pozo. Luego la limitación actual es la disponibilidad de un viscosímetro por lo menos con 20000 psi y 260 °C. Aunque la variable de análisis en la reología es la temperatura, el efecto de la presión solo es muy importante a valores mayores de 4000 psi por ser el lodo un coloide.[10]

- Es indispensable efectuar un estudio reológico a diferentes densidades del lodo para analizar la aplicabilidad industrial del modelo matemático de velocidad terminal propuesto en este trabajo, simulando las condiciones del pozo. Sin duda alguna, esta limitante hace parte del quehacer investigativo.

[10] ADAMSON, Arthur W. Physical Chemistry of Surfaces. EE.UU: Intercience Publishers Inc. 1964.

4. CONCLUSIONES

1. El modelo reológico para un lodo de perforación base agua que mejor responde al transporte de sólidos y a la limpieza de un pozo horizontal o cualquier pozo direccional sin importar las fluctuaciones de temperatura, es el pseudoplástico de Ostwald de Waele. Por tanto, las viscosidades de un lodo base agua deben cumplir con este modelo reológico con un pH alcalino, con densidad y valores de tensión superficial mayores al del agua líquida.

2. Se descubre que los aditivos químicos que se pueden agregar a un lodo base agua proporcionándole viscosidad e incremento en la tensión superficial son el almidón de yuca y la glicerina con un impacto en la disminución de la velocidad terminal de los sólidos, en consecuencia, la mezcla y adición de los dos químicos mejora la limpieza del pozo.

3. Si es posible desarrollar un simulador de trayectorias direccionales mediante algoritmos genéticos como herramienta innovadora en el país, el cual tiene como valor agregado el diseño flexible de trayectorias con rangos y parámetros de operatividad.

4. En este trabajo se han sentado las bases para el diseño y simulación computacional de las trayectorias direccionales con sus respectivos lodos implementando aditivos químicos que mejoran la limpieza del pozo.

5 RECOMENDACIONES

1. Se recomienda la sustitución y el empleo de lodos base agua con el uso de almidones como una oportunidad para desarrollar una industria propia de fluidos de perforación en el país.

2. Se recomienda diseñar un prototipo de perforación direccional para observar el comportamiento de los lodos y el transporte de los sólidos.

3. Se recomienda desarrollar un estudio sobre los bactericidas que se pueden aplicar para el control de bacterias en el pozo debido al empleo del almidón.

4. Se recomienda efectuar una comparación con otro software direccional para verificar la precisión del programa respecto a otra herramienta.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. RABIA, OilWell Drilling Engineering Principles and Practices. Graham. 1985.

2. LUBINSKI, Arthur. Developments in Petroleum Engineering. Volumen 1.1976.

3. BIRD, Byron and STEWART Warren. Fenómenos de transporte. Reverté. 1997.

4. DURTE, Alberto. Operaciones de transferencia de momentum y manejo de sólidos. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Química. Bogotá. 1998.

5. NILSSON, Nils. Inteligencia Artificial, una nueva síntesis. Mc Graw Hill. 2001.

6. POTTER, Merle and WIGGERT, David. Mecánica de fluidos. 2° Edición. Prentice Hall. Mexico 1998.

7. FOUST, Alan. Principios de operaciones unitarias. Editorial Continental. Mexico. 2004.

8. GELFGAT, Mikhail. Advanced drilling solutions, lessons from the FSU. Volumen II.Oklahoma.2003.

9. BERNT, Aadnoy. Modern Well Desing. Balkema /Rotterdam/ Brookfield.1999.

10. ALDRED, W. D. Improving drilling efficiency through the application of PERFORM, performance by risk management. IADC, SPE paper 57574. Presented at the IADC/SPE Middle East Drilling Technology Conference, Abu Dhabi. United Arab Emirates. 8-10 November 1999.

11. GOLBERG, Davis. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley. Alabama. 5° Edition. 2005.

12. LEVENSPIEL, Octave. Fluidization Engineering. John Wiley. London.1975.

13. ADAMSON, Arthur W. Physical Chemistry of Surfaces. EE.UU: Intercience Publishers Inc. 1964.

14. SILVA, Gloria. Estudio del efecto estabilizador de tensoactivos en las mezclas Carbón-Agua. Bucaramanga 1989. Tesis de Pregrado (Ingeniero Químico), Universidad Industrial de Santander. Departamento de Ingeniería Química.

15. HIRSCHFELDER, C. The Molecular theory of gases and liquids. Wiley. New York. 1971.

ANEXOS

ANEXO A. MANUAL DE USUARIO

Genetic Wellbore Trayectory Simulator

GENTRAS 1.0

POR: ING. NELSON E. BARROS GALVIS

TESISTA DEL GRUPO DE ESTABILIDAD DE POZOS EN CONVENIO UIS - ICP

La propuesta de crear un simulador inteligente de trayectorias direccionales se plantea como una herramienta auxiliar útil en el planeamiento de pozos. El desarrollo de este instrumento se fundamenta en los conceptos de inteligencia artificial, específicamente en la aplicación de los algoritmos genéticos y en el método de la mínima curvatura usado en el diseño de trayectorias direccionales. Este manual de usuario tiene como objetivo dar orientación de cómo emplear este software.

- **INSTALACION DEL PROGRAMA**

Para la instalación de este programa se requiere crear una carpeta en el escritorio del computador y copiar el proyecto GENTRAS 1.0; o en su defecto, se deben copiar los 3 ejecutables contiene este proyecto para su funcionamiento. Ver figura 1.

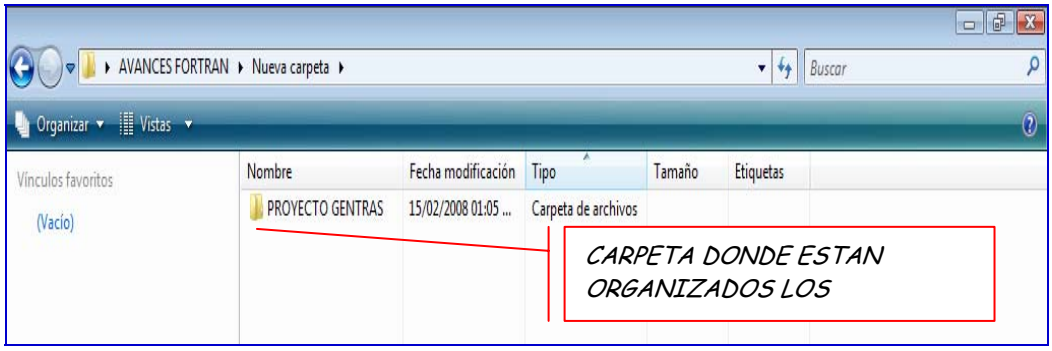


Figura 1. Pantalla donde están organizados los ejecutables del proyecto.

En esta carpeta, Proyecto GENTRAS es necesario verificar los tres ejecutables: GENTRAS.exe de Visual Fortran 90, GENTRAS VB.exe de Visual Basic 6.0 y trayectoria.exe de Visual C++. Los otros archivos de texto o archivos planos que aparecen en la imagen son archivos de salida y de lectura generados a partir de los ejecutables mencionados.

Accionando el ejecutable de GENTRAS VB.exe de Visual Basic 6.0 se cargan o se enlazan los otros dos ejecutables; de tal manera que para emplear el programa basta con ejecutar este archivo de Visual Basic 6.0 que actúa como organizador central de todo el software. Ver figura 2

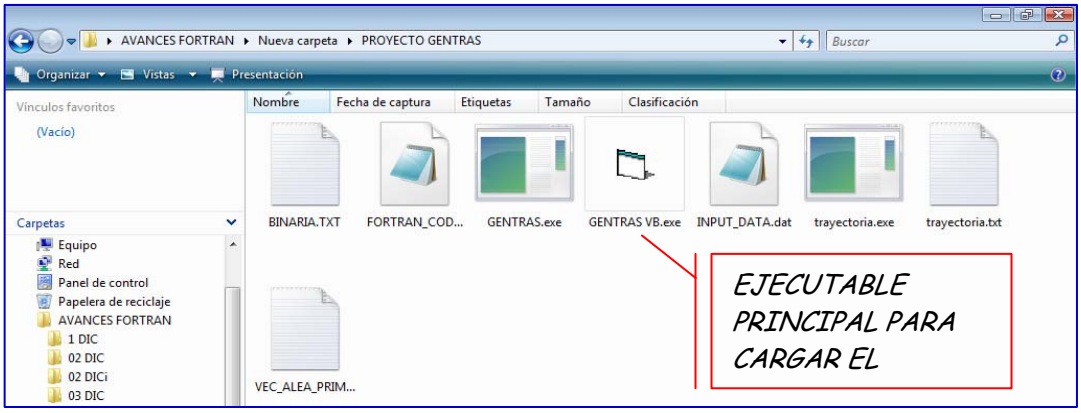


Figura 2. Pantalla donde evidencia el ejecutable principal

Una vez se efectúe click en el ejecutable de Visual Basic se solicita la autorización mediante una cotraseña de inicio. En el espacio de **KEYWORD6** resaltado con el óvalo se digita la cotraseña: piratas. En los espacios **Choose an Option** se seleccionan el octavo y el cuarto espacio, para luego presionar en el botón OK. Ver figura 3.

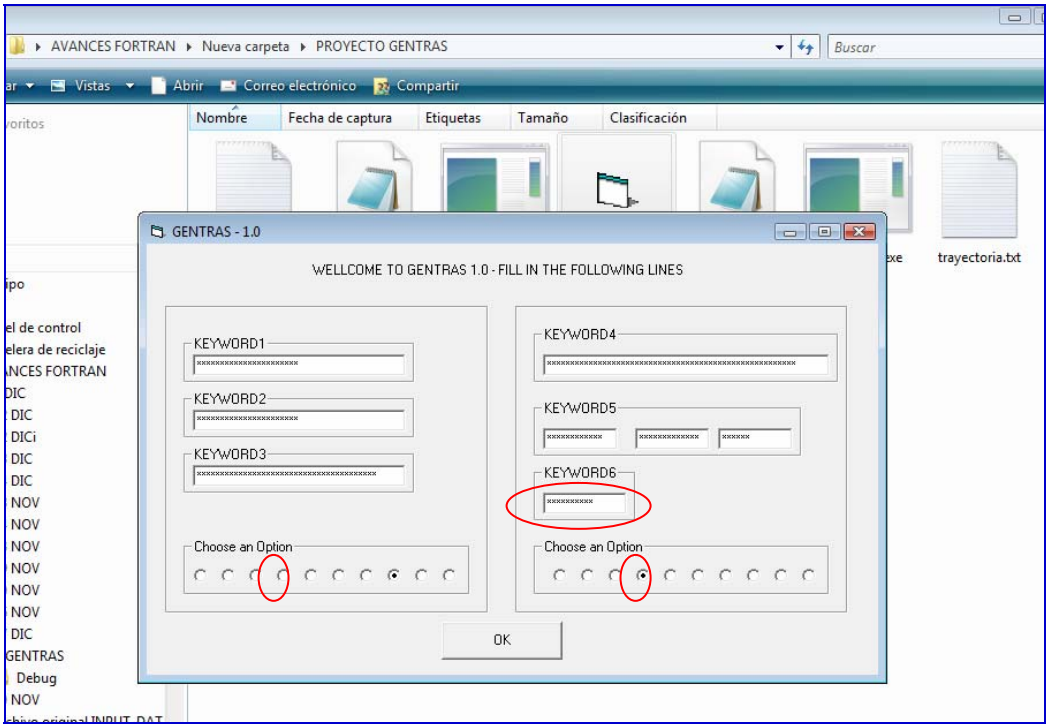


Figura 3. Ingreso de la cotraseña o clave para cargar y correr el programa.

Con la cootraseña de autorización se pueden copiar o ejecutar los programas de Fortran, Visual Basic y Visual C++ de manera independiente, ubicándolos en el escritorio del PC.

Una vez autorizado con la cotraseña y respectivamente organizado el proyecto GENTRAS 1.0, se pulsa en el logo del software que aparece en el escritorio del PC y automaticamente se carga el programa. Tal como se observa en la siguiente figura, cuyo icono esta resaltado.

Figura 4. Imagen donde aparece el icono de carga.

- **DATOS GENERALES DE GENTRAS 1.0**

Con el programa cargado es necesario insertar los datos de ingreso. Esta ventana de opción es para abrir o crear un nuevo proyecto de GENTRAS 1.0 se cree que a través de esta opción se acoplará con el software de Análisis Geomecánico de Estabilidad AGE. La opción de close efectivamente es para cerrar o salir del programa.

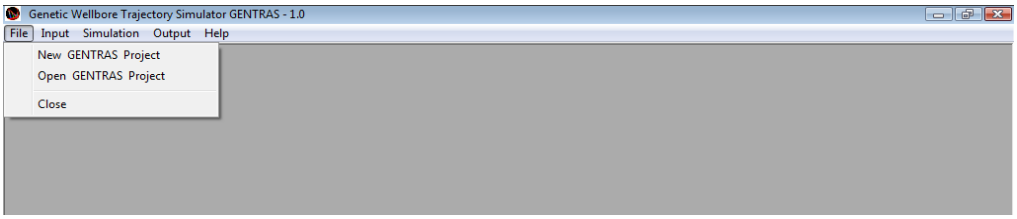


Figura 5. Ventana File para acople del programa con el software de análisis geomecánico.

- **DATOS DE INGRESO O DE ENTRADA PARA EL TIPO DE TRAYECTORIA O MODELO DE PERFORACION MEDIANTE GENTRAS 1.0**

  En este formulario de ingreso de datos se selecciona el tipo de trayectoria que se desea diseñar mediante la pestaña WELL TRAJECTORY. GENTRAS 1.0 está programado para cuatro (4) opciones de trayectorias como se puede observar en el subtitulo SELECT WELLBORE TRAJECTORY TYPE de la siguiente figura:

1. “J” TRAJECTORY (Type 1)
2. “S” TRAJECTORY FINISHED HORIZONTALLY (Type 2)
3. “S” TRAJECTORY FINISHED VERTICALLY (Type 2)
4. HORIZONTALLY TRAJECTORY (Type 3)

  Es obligatorio seleccionar un tipo de trayectoria para luego registrar o correlacionar los parámetros geométricos necesarios para el diseño de la trayectoria.

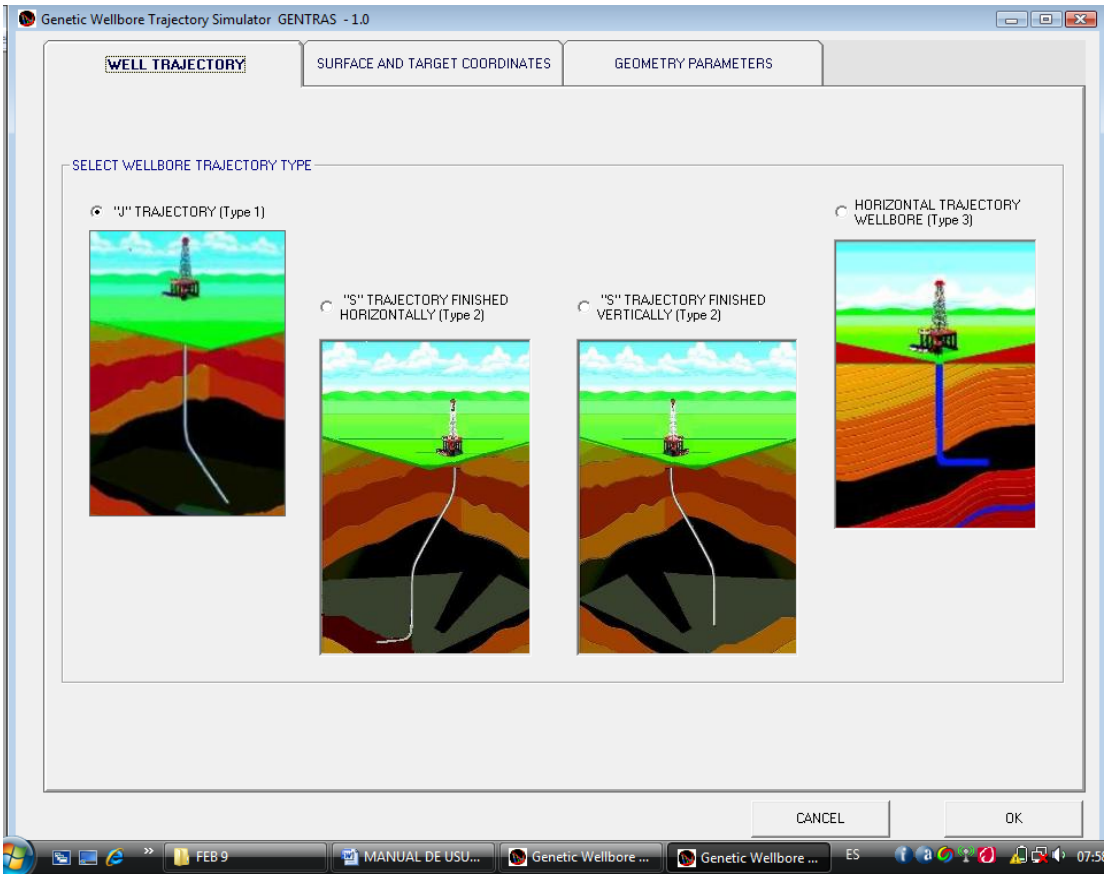


Figura 6. Selección de la trayectoria direccional.

- **DATOS DE INGRESO O ENTRADA PARA LAS COORDENADAS DEL SURFACE Y EL TARGET EMPLEADAS EN EL TIPO DE TRAYECTORIA O MODELO DE PERFORACION.**

  En este formato de ingreso de datos se registran las coordenadas del target y la ubicación de la torre en superficie. Considerese la letra N (North), S (South), E (East) y la W (West) en unidades de pies (ft). Tales localizaciones se efectúan mediante tres opciones:

1. WELLBORE TRAJECTORY ON A QUADRANT

   Se selecciona esta opción cuando las coordenadas del target y surface están en el mismo cuadrante; es decir, en el 1, 2, 3 o 4, tal como se evidencia en la figura 7. En efecto, se activan los siguientes items y se

resalta el cuadrante con un color:

- Quadrant 1 (North – East)
- Quadrant 2 (South – East)
- Quadrant 3 (South – West)
- Quadrant 4 (North – West)

De acuerdo al cuadrante seleccionado se activan las celdas de las coordenadas del target y surface. A estas celdas deben asignárseles números reales positivos diferentes de cero, **al programa no se le debe insertar ni letras ni símbolos**.

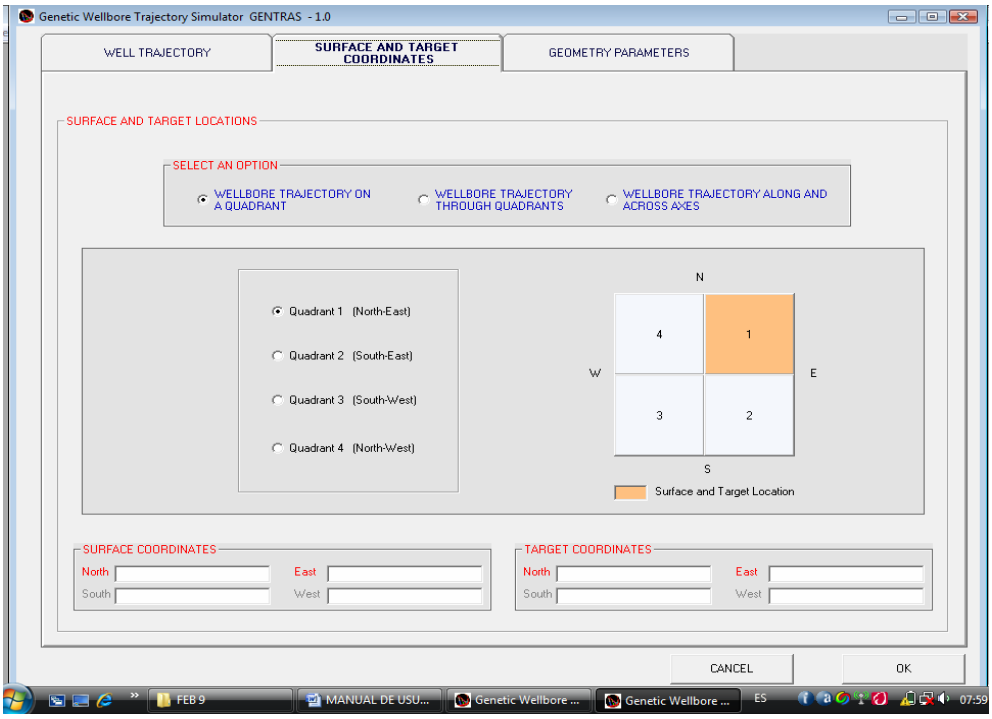


Figura 7. Coordenadas de torre y fondo de a la ubicación por cuadrantes

2. WELLBORE TRAJECTORY THROUGH QUADRANTS

Se selecciona esta opción cuando las coordenadas el target y el surface no están en el mismo cuadrante; es decir, el surface aparece en el cuadrante 1 y el target en el 2; de igual manera se cumple para los otros

cuadrantes. En efecto, se activa o se marca el cuadrante del surface y por inferencia el otro cuadrante le corresponde al target. Cada cuadrante se resalta con un color tal como se observa en la imagen, en este caso los colores son verde y azul indicando las coordenadas de torre y fondo respectivamente. Ver figura 8.

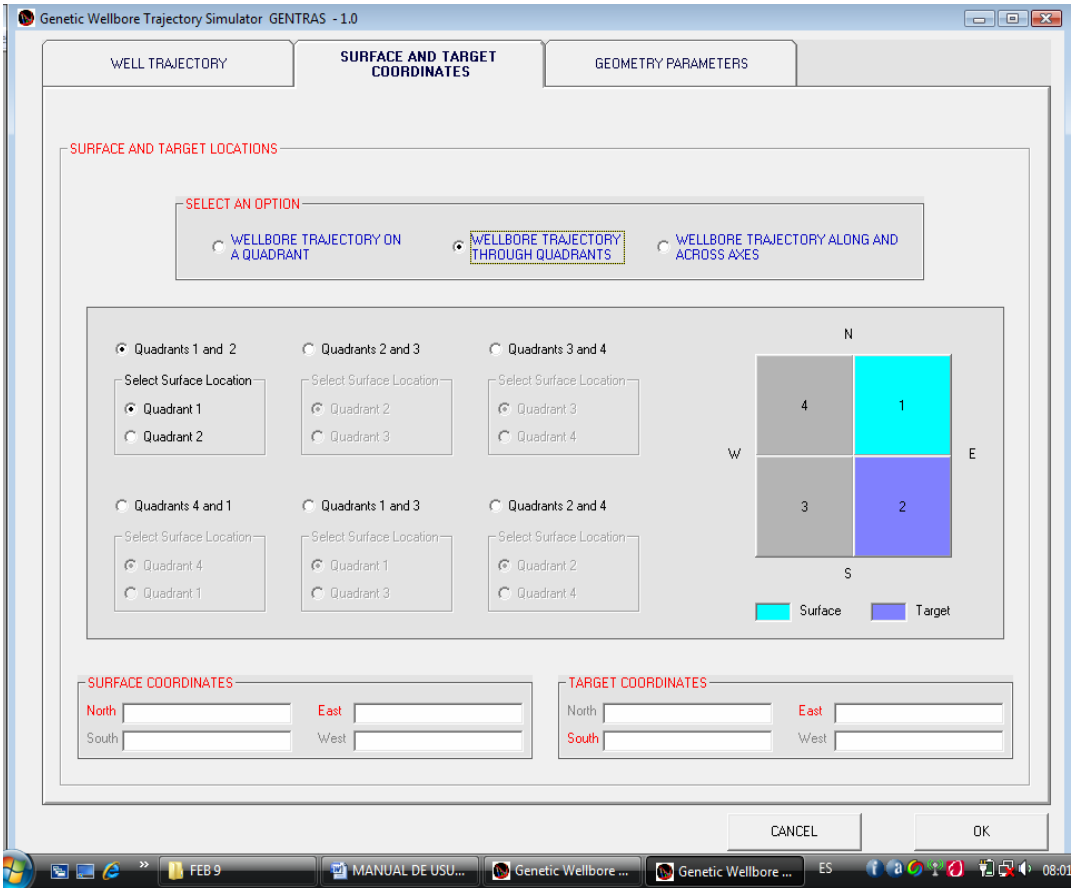


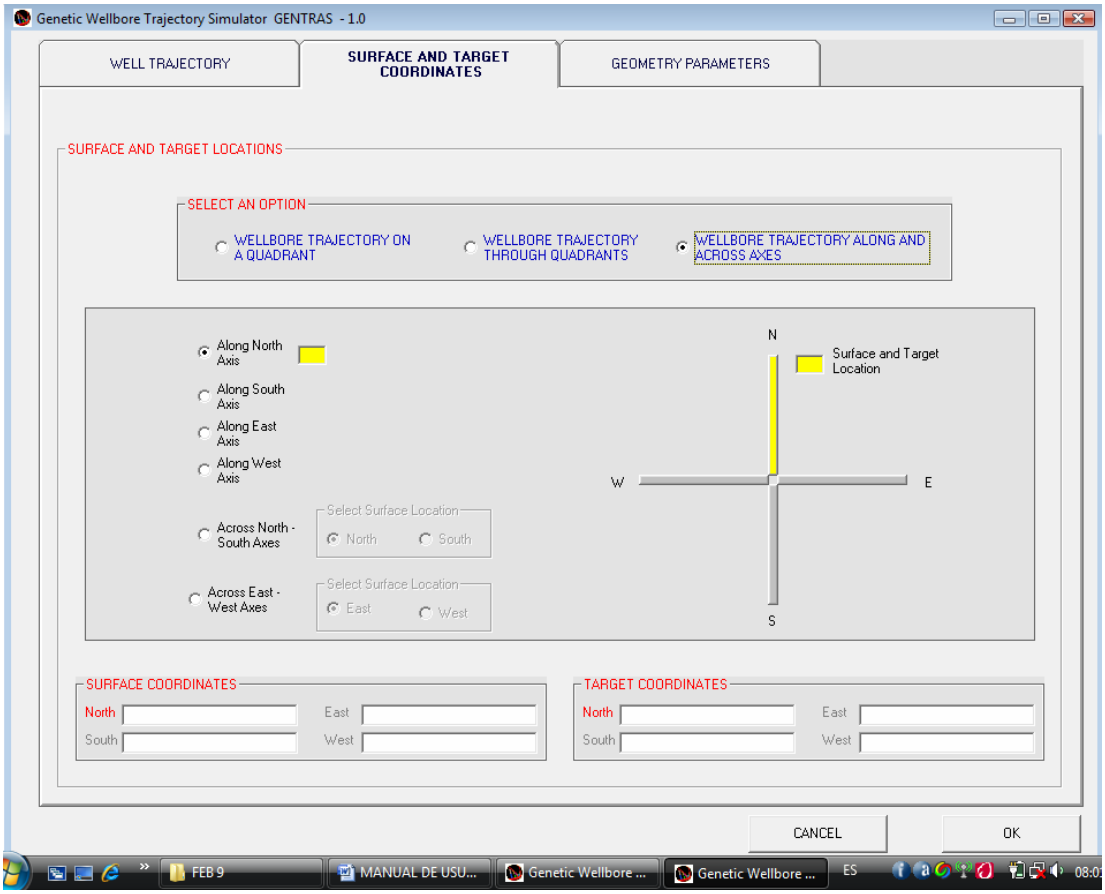
Figura 8. Ubicación de las coordenadas de torrre y fondo respectivamente.

De acuerdo a los cuadrantes seleccionados se activan las celdas de ingreso de datos, tanto para las coordenadas del target y del surface. **A estas celdas deben asignárseles un número real positivo diferente de cero, el programa no recibe letras ni símbolos.**

3. WELLBORE TRAJECTORY ALONG AND ACROSS AXES

Se selecciona esta opción cuando las coordenadas del target y del surface

están en el mismo eje de coordenadas; es decir, el surface y el target aparecen en el eje norte, sur, este u oeste; de igual manera, se cumple para cualquier eje seleccionado. En efecto, se activan las celdas que corresponden al target y al surface; asignando un color de acuerdo al caso. Ver figura 9.



Si las coordenadas de torre y fondo se ubican partiendo en el eje norte y culminando en el sur o viceversa, el programa acciona un nuevo color dando como alternativa la localización del surface y tomando por defecto el target. Obsérvese la figura 10.

De acuerdo a los ejes seleccionados se activan las celdas de las coordenadas del target y del surface. **A cada celda debe asignársele un número real positivo diferente de cero, el programa no recibe letras ni símbolos.**

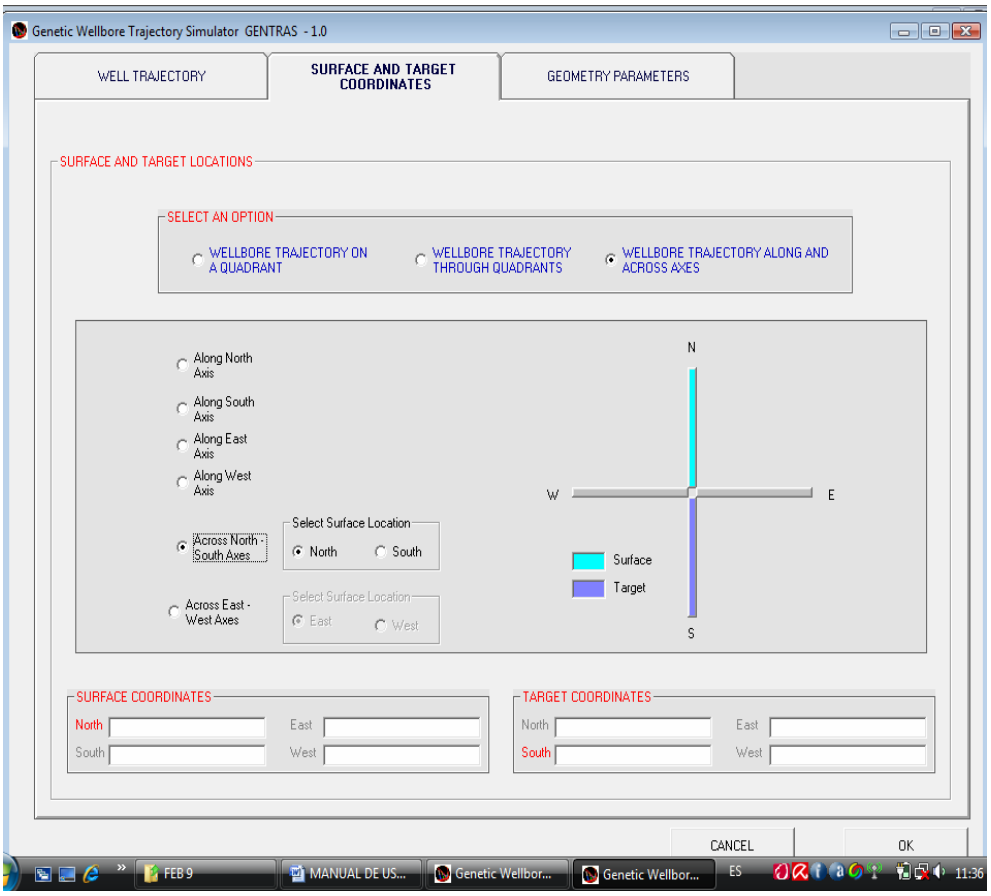


Figura 10. Localización del surface y target empleando dos ejes diferentes.

- **INGRESO DE LOS PARAMETROS GEOMETRICOS**

A diferencia del TVD (True Vertical Depth) el ingreso de los parámatros geométricos del pozo se insertan con rangos mínimos y máximos; estos datos los emplea el programa para optimizar y seleccionar los valores más viables en el diseño de la trayectoria. El significado geométrico de los parámetros se esboza en una figura en dos dimensiones al igual que sus unidades, la única limitación aparece en el azimut que no se refleja en esta gráfica por requerir una vista de planta. Ver figura 11.

De acuerdo al modelo de trayectoria seleccionado, se adjuntan los parámetros que se requieren para el diseño. Los valores digitados en las celdas deben ser numéricos. También deben analizarse que las distancias tienen un orden lógico de magnitud, o sea:

El valor del KOP < El valor del Build up < El valor del Drop up < El valor del TVD

Esta es la razón fundamental de la gráfica, dar a comprender este orden lógico de magnitud.

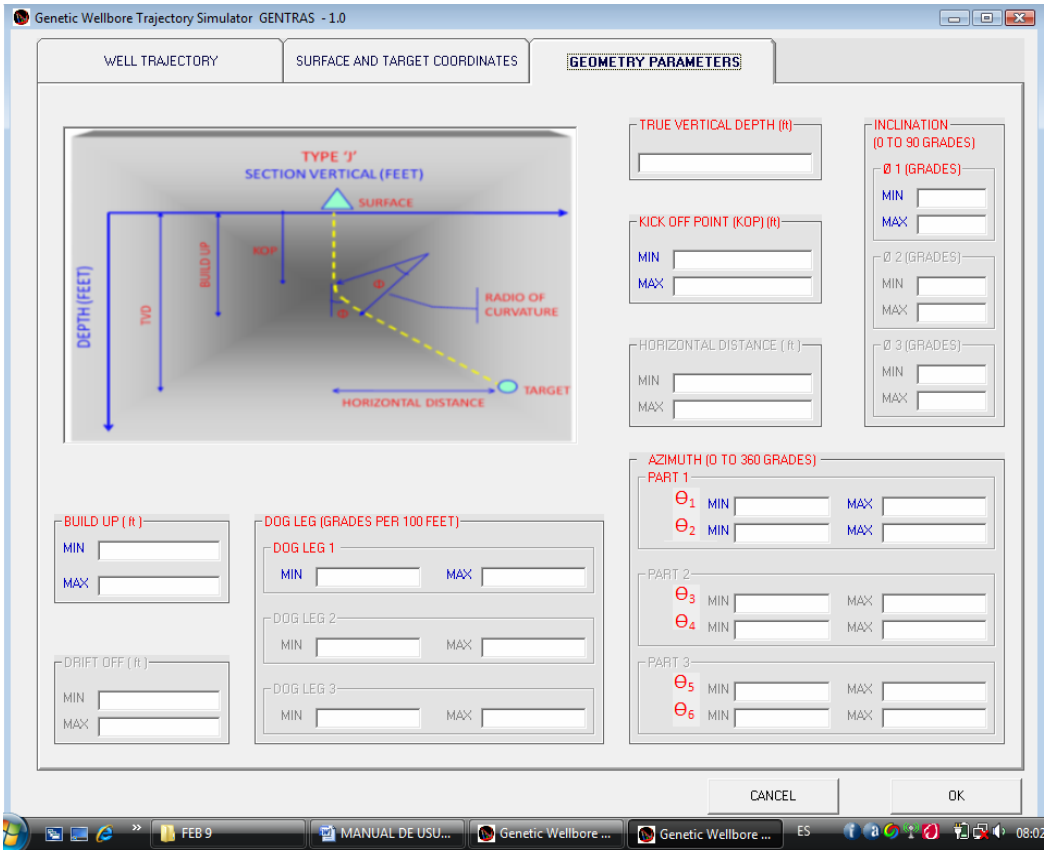


Figura 11. Ingreso de datos para la trayectoria tipo J.

- **DISEÑO DE LA TRAYECTORIA**

Una vez se hayan consignados los datos de entrada y se oprima el botón OK se procede a efectuar la simulación en la etiqueta Create Gentras Simulation. El software internamente desarrolla sus cálculos para arrojar los archivos de salida con extensión (.NBG) que se agregan automáticamente a la carpeta donde están los ejecutables. Ver figura 12 y

13.

Figura 12. Creación de la simulación.

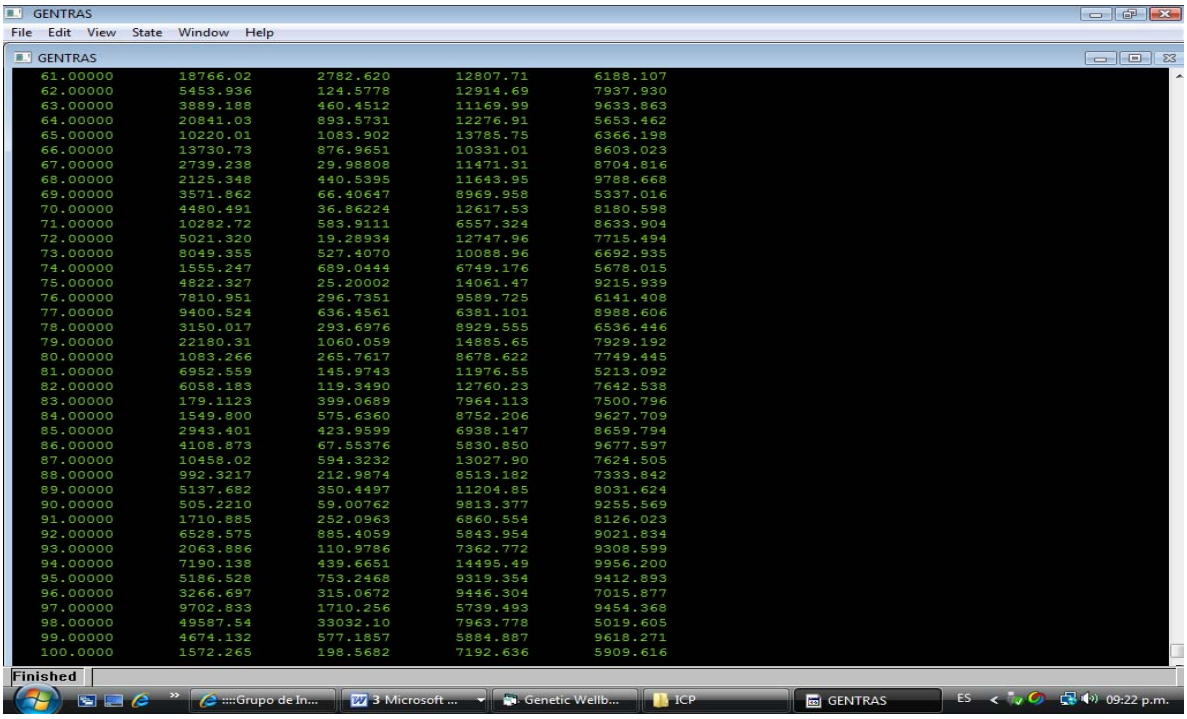


Figura 13. Corrida o simulación del programa

- **ARCHIVOS DE SALIDA**

Los archivos de salida que arroja GENTRAS 1.0 son archivos planos con la extensión.NBG; es importante mencionar que el único archivo.dat es el que genera internamente el ejecutable de Visual Basic 6.0 para enlazarse con el Ejecutable de Visual Fortran 90. Los anteriores archivos pueden ser abiertos o copiados en el block de notas de Windows.

La visualización se efectúa con una trayectoria seleccionada, aunque el

programa computacional selecciona las diez (10) mejores trayectorias que hayan cumplido con los requerimientos operacionales para ser estudiadas geomecánicamente. Todos los archivos de salida se verifican en el output date con su respectiva ventana de visualización. Ver figura 14 y 14ª.

Figura 14. Output Date

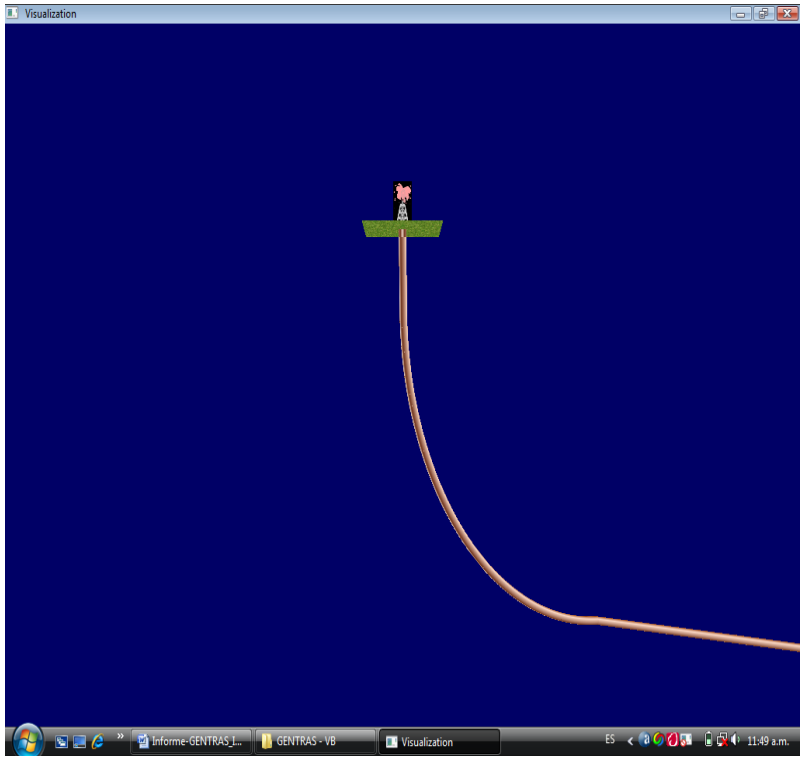


Figura 14ª. Archivo de salida: gráfico de visualización.

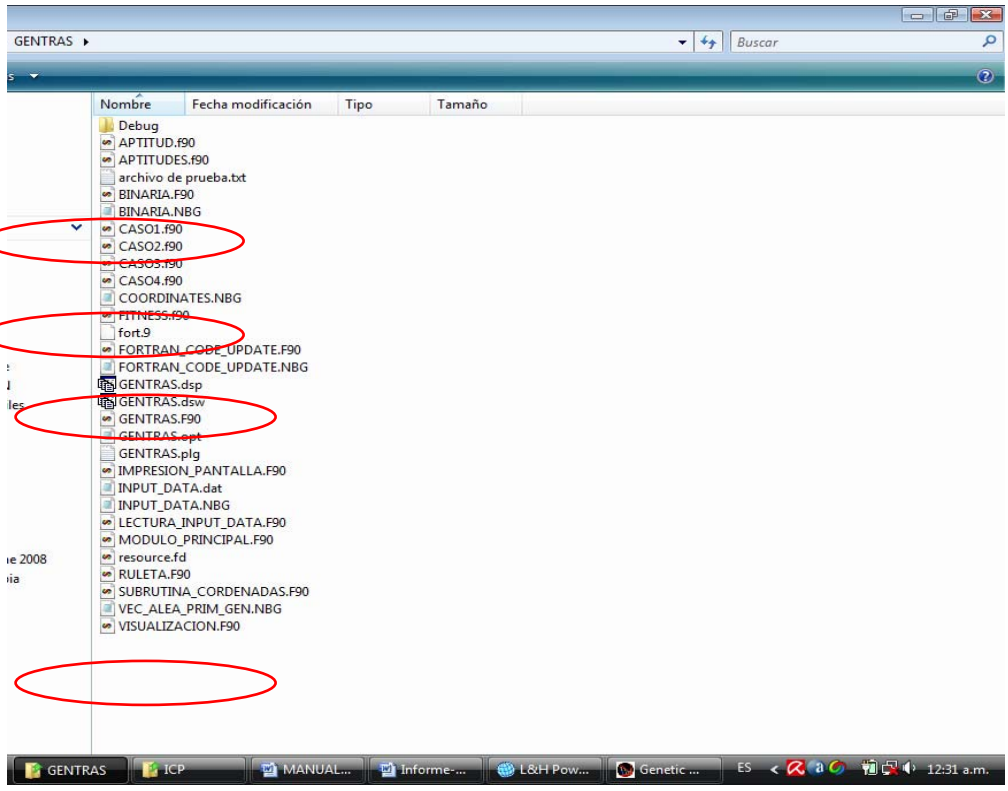


Figura 15. Archivos .NBG de salida de datos

- **HELP O AYUDAS**

Son ayudas o temas relacionados con el contenido del programa, con una descripción del mismo y con una fecha de actualización; donde se puede encontrar el manual de usuario, actualización y descripción del software.

Figura 16. Descripción del help.

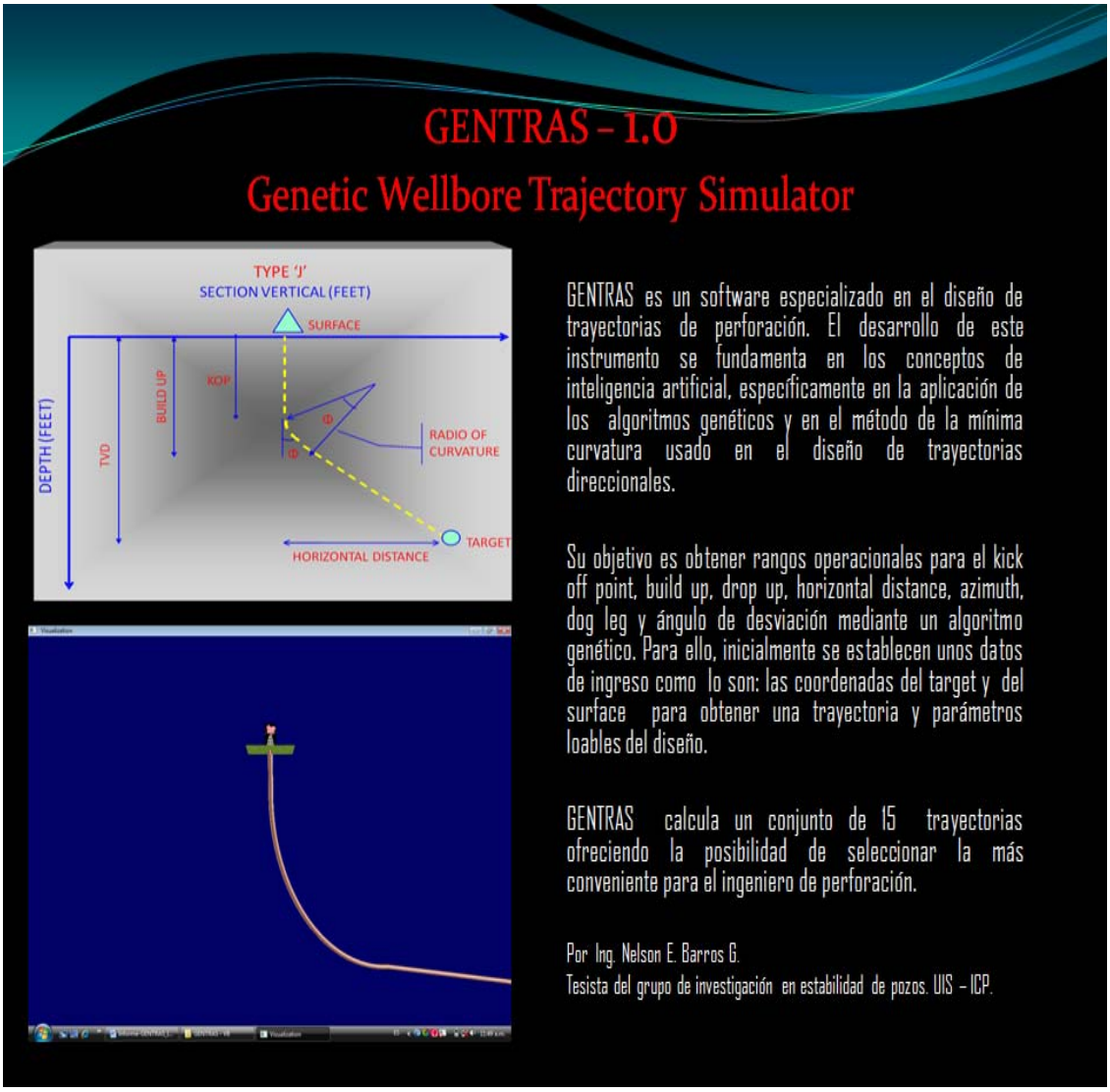

GENTRAS – 1.0
Genetic Wellbore Trajectory Simulator
TYPE 'J'
SECTION VERTICAL (FEET)
SURFACE
KOP
BUILD UP
TVD
DEPTH (FEET)
RADIO OF CURVATURE
TARGET
HORIZONTAL DISTANCE
GENTRAS es un software especializado en el diseño de trayectorias de perforación. El desarrollo de este instrumento se fundamenta en los conceptos de inteligencia artificial, específicamente en la aplicación de los algoritmos genéticos y en el método de la mínima curvatura usado en el diseño de trayectorias direccionales.
Su objetivo es obtener rangos operacionales para el kick off point, build up, drop up, horizontal distance, azimuth, dog leg y ángulo de desviación mediante un algoritmo genético. Para ello, inicialmente se establecen unos datos de ingreso como lo son: las coordenadas del target y del surface para obtener una trayectoria y parámetros loables del diseño.
GENTRAS calcula un conjunto de 15 trayectorias ofreciendo la posibilidad de seleccionar la más conveniente para el ingeniero de perforación.
Por Ing. Nelson E. Barros G.
Tesista del grupo de investigación en estabilidad de pozos. UIS – ICP.

Figura 17. Ventana del About simulation en Español.

ANEXO B

DATOS BÁSICOS DE SALIDA EN EL DISEÑO DE LA TRAYECTORIA MEDIANTE GENTRAS 1.0

BASIC DATE OF TRAYECTORY

COLUMN 1: TRUE VERTICAL DEPTH (TVD)(ft)

COLUMN 2: TRUE MEASURED DEPTH (TMD)(ft)

COLUMN 3: AZIMUTH - ZONE 1 (TETA_UNO) (GRADES)

COLUMN 4: INCLINATION ANGLE (FI) (GRADES) FI

FITNESS GENETIC: 9.4504245E-02

COLUMN 1	COLUMN 2	COLUMN 3	COLUMN 4
0.000E+00	0.00000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
100.0000	100.0000	0.0000000E+00	0.0000000E+00
200.0000	200.0000	0.0000000E+00	0.0000000E+00
300.0000	300.0000	0.0000000E+00	0.0000000E+00
400.0000	400.0000	0.0000000E+00	0.0000000E+00
500.0000	500.0000	0.0000000E+00	0.0000000E+00
600.0000	600.0000	0.0000000E+00	0.0000000E+00
602.0000	602.0000	0.0000000E+00	0.0000000E+00
699.9702	700.0000	69.10114	1.999047
799.8181	800.0000	69.10114	3.998093
899.4227	900.0000	69.10114	5.997140
998.6630	1000.000	69.10114	7.996186
1097.418	1100.000	69.10114	9.995233
1195.568	1200.000	69.10114	11.99428
1292.992	1300.000	69.10114	13.99333
1389.573	1400.000	69.10114	15.99237
1485.193	1500.000	69.10114	17.99142
1579.736	1600.000	69.10114	19.99047

1673.086	1700.000	69.10114	21.98951
1765.130	1800.000	69.10114	23.98856
1855.756	1900.000	69.10114	25.98761
1944.853	2000.000	69.10114	27.98665
2032.313	2100.000	69.10114	29.98570
2118.030	2200.000	69.10114	31.98475
2201.899	2300.000	69.10114	33.98379
2283.819	2400.000	69.10114	35.98284
2363.689	2500.000	69.10114	37.98188
2441.412	2600.000	69.10114	39.98093
2516.894	2700.000	69.10114	41.97998
2590.042	2800.000	69.10114	43.97902
2660.769	2900.000	69.10114	45.97807
2728.987	3000.000	69.10114	47.97712
2794.614	3100.000	69.10114	49.97617
2857.569	3200.000	69.10114	51.97521
2917.776	3300.000	69.10114	53.97426
2975.163	3400.000	69.10114	55.97330
3029.658	3500.000	69.10114	57.97235
3081.196	3600.000	69.10114	59.97140
3129.714	3700.000	69.10114	61.97044
3175.153	3800.000	69.10114	63.96949
3217.458	3900.000	69.10114	65.96854
3256.576	4000.000	69.10114	67.96758
3292.461	4100.000	69.10114	69.96663
3325.069	4200.000	69.10114	71.96568
3354.359	4300.000	69.10114	73.96472
3380.298	4400.000	69.10114	75.96377
3402.852	4500.000	69.10114	77.96281
3421.994	4600.000	69.10114	79.96186

3437.702	4700.000	69.10114	81.96091
3449.956	4800.000	69.10114	83.95995
3458.740	4900.000	69.10114	85.95900
3464.045	5000.000	69.10114	87.95805
3465.865	5100.000	69.10114	89.95709

END OF FILE

ANEXO C

FOTOGRAFIAS DEL FLUIDO CON LOS SOLIDOS EN SUSPENSION